

## 出國報告（出國類別：開會）

### 參加「核廢棄物處理與處置研討會」

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：黃秉修組長

蔡瀚儀

派赴國家：法國

出國期間：103年11月10日~103年11月21日

報告日期：104年1月15日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加「核廢棄物處理與處置研討會」

頁數 30 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話:台灣電力公司/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

黃秉修/台灣電力公司/核能後端營運處/核能工程監/02-23657210 ext:2230

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：2013/11/10-2013/11/21 出國地區：法國

報告日期：2014/01/15

分類號/目

關鍵詞：核廢棄物處理

內容摘要：(二百至三百字)

- 一、為解決核廢料問題，法國在 1979 年成立國家核廢料管理局 (ANDRA)。員工約 650 人，下設 10 個部門 (4 個管理及溝通部門、6 個技術及業務部門)，3 個最終處置設施。該局為獨立運作之專責機構，負責規劃、興建及營運法國的高階、低階核廢料處置工作。
- 二、法國已成功營運兩座低階核廢料處置場，且已規劃高階核廢料處置場，預定於 2025 年開始啟用。
- 三、法國用過核子燃料再處理方式為將用過核子燃料所含的約 95~96%可再利用的鈾、鈾元素經由再處理程序回收，剩下的廢棄物經由玻璃固化後以地下豎坑 (pit) 方式進行中期貯存，以空氣對流方式冷卻玻璃固化的高放射性廢棄物，之後再放入深層地質處置 (Cigeo Program)。
- 四、法國於 1999 年 8 月建立【默茲/上馬恩省】高放廢棄物地下研究實驗室，此實驗室位於 500 公尺深處之黏土層 (argillite)，稱為 Cigeo Program；預計 2025 年高放廢棄物場之工程與貯存處置同步開展，工程與營運將長達 85 年。
- 五、法國低放射性廢棄物最終處置場的設計，類似世界其他核能使用國家作法，採「多重障壁」的概念，也就是利用多項的防護措施，隔絕放射性廢棄物於人類生活環境之外。這些多重障壁包括低放射性廢棄物固化體、廢棄物容器、填充材料、工程設施、排水設施等工程障壁及天然障壁等。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.nat.gov.tw/reportwork>)

## 目 次

壹、目的 .....	1
貳、行程 .....	2
參、工作內容 .....	3
肆、心得及建議.....	38

## 壹、目的

經本次與法國相關單位的廣泛交流討論，了解法國已成立國家放射性廢棄物專責機構，且對於高、低放射性廢棄物處置設施都規劃有完善的系統並有具體的建置進度。法國目前也已興建深層地質處置的地下實驗室，以進行高放射性廢棄物處置相關技術驗證工作，且正在提出最終處置場的建造執照申請書，已實質上建立完整的放射性廢棄物營運體系。此行藉由吸收法國處理核廢料之技術與推展經驗，可回饋並作為本公司之放射性廢棄物管理及推動之參考。另，在目前本公司推動用過核子燃料中期貯存、放射性廢棄物最終處置設施困難之際，再處理也可提供國內用過核子燃料處理更多元的選擇。

## 貳、過程

自 103 年 11 月 10 日出發，迄 11 月 21 日返國（共計 12 天），停留巴黎、蘇萊內迪伊縣及博蒙阿格市三地。詳細訪問行程如下：

日期	地點與行程	工作內容
11 月 10 日（一）	台北到巴黎	轉機
11 月 11 日（二）	台北到巴黎	去程
11 月 12 日（三）	巴黎	參加 ANDRA「核廢棄物處理與處置研討會」
11 月 13 日（四）	巴黎到蘇萊內迪伊縣	去程
11 月 14 日（五）	蘇萊內迪伊縣	拜會 ANDRA Centre De l'aube 低放射性廢棄物最終處置場，參加「低放射性廢棄物淺地層處置設施設計、接收、營運」會議
11 月 15 日（六）	蘇萊內迪伊縣到巴黎	返程
11 月 16 日（日）	巴黎到博蒙阿格市	去程
11 月 17 日（一）	博蒙阿格市	拜會 ANDRA Manche 低放射性廢棄物最終處置場，參加「低放射性廢棄物管理各階段之營運與監管」會議
11 月 18 日（二）	博蒙阿格市到巴黎	返程
11 月 19 日（三）	巴黎	拜會 ANDRA，討論低放射性廢棄物最終處置計畫實施
11 月 20 日（四）	巴黎到台北	返程轉機
11 月 21 日（五）	巴黎到台北	台北

## 參、工作內容

### 一、參加「核廢棄物處理與處置研討會」

#### (一) 主題 1：用過核子燃料再處理規劃

用過核子燃料所含之放射性廢棄物主要為鈾、鈾元素，以及核分裂產物 and 用過核子燃料機械結構物。再處理過程中回收分離鈾和鈾元素後，剩下的廢棄物目前國際廣為採用以下的方式處理：

廢棄物種類	處理方式
再處理後廢棄物	採用玻璃固化法，將再處理後廢棄物與玻璃原材料混合，經高溫加熱熔融後，製成玻璃固化體。國際上通稱為「玻璃固化廢棄物 (Vitrified Waste)」，裝入以不銹鋼製成之圓筒狀容器後，密封貯存。
用過核子燃料機械結構物	採用超高壓壓縮機將其壓縮降低廢棄物體積，國際上通稱為「技術廢棄物 (Technology Waste)」，裝入以不銹鋼製成之圓筒狀容器後，密封貯存。

#### 1. 法國的用過核子燃料再處理

1959 年 CEA 決定建造 UP2 廠以處理天然鈾氣體石墨反應器 (GCR) 所產生的用過核子燃料。為了能處理輕水式反應器所退出之用過核子燃料，1974 年 CEA 在 UP2 廠增建一座稱為高活度氧化 (High Activity Oxide (HAO)) 之工廠。UP2 及 HAO 構成所謂的 UP2-400，於 1978 年開始運轉，每年可再處理 400 噸之用過核子燃料。1981 年 5 月 12 日，法國政府核准 COGEMA 建造下列兩座再處理廠及一座淨化廠：(1) UP3：每年可再處理約 850 噸的輕水式反應器所退出之用過核子燃料。(2) UP2-800：每年亦可再處理約 850 噸的輕水式反應器所退出之用過核子燃料。(3) STE3：用以將前述兩座再處理廠之排放物質淨化後再排放至大海。

再處理程序已有 50 年以上之成熟技術，以送往法國進行再處理的國家為例：涵蓋歐洲的德國、比利時、荷蘭、瑞士、西班牙，以及亞洲的日本等國；俄羅斯也代為處理過芬蘭、德國、匈牙利、烏克蘭、保加利亞等國之用過核子

燃料。用過核子燃料以及再處理廢棄物運送，不論是經由陸路運輸或是海運，都具有豐富的安全經驗。

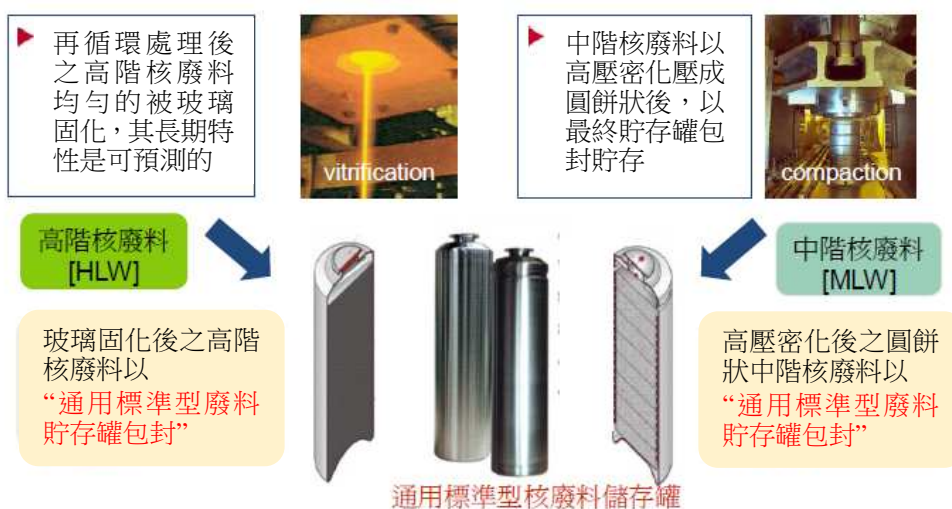


圖 1 用過核子燃料再處理後之產物

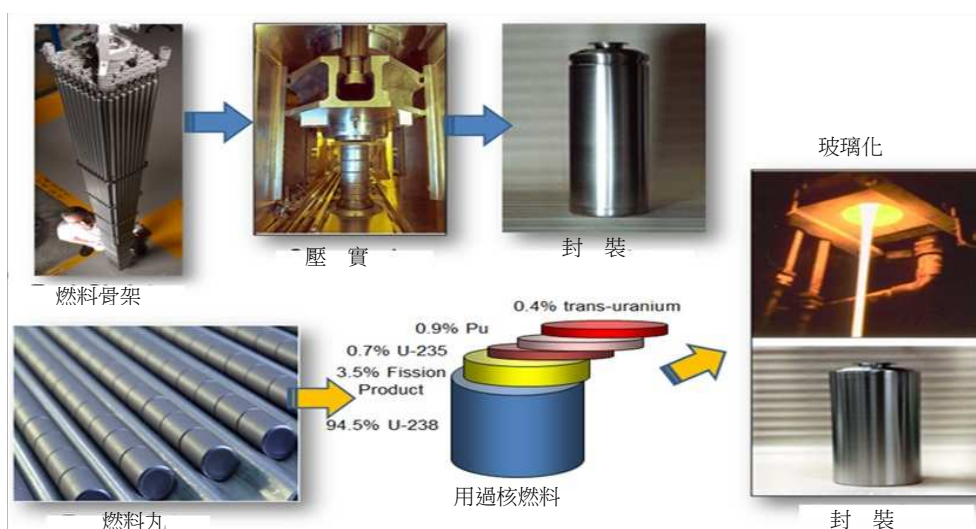


圖 2 用過核子燃料再處理程序

## 2. 用過核子燃料再處理程序

核能的特點之一是可將使用過的核子燃料進行再處理程序，將有用資源予以回收製成燃料，重新提供核能電廠使用，亦可減少高放射性廢棄物的體積和放射性強度。輕水式核能電廠的用過核子燃料，約含有 96%可供回收使用的鈾、鈾元素（鈾約 95.6%、鈾約 0.9%），經由再處理程序製成燃料，可重新供給核能電廠使用，相當於可減少三分之一的天然鈾礦需求。

每公噸用過核子燃料直接處置之體積約 2 立方公尺，經再處理後剩餘約 3.5% 的分裂產物和微量鈾系元素，經玻璃固化之後成為高放射性廢棄物，裝入不銹鋼筒中進行貯存，再安排最終處置。最終處置場的概念是將廢棄物經過適當包封後，深埋於地質穩定的深層岩層中，與人類生活環境長期隔絕。

若以現行再處理技術將用過核子燃料進行再處理，其每公噸用過核子燃料所產生之高放射性廢棄物體積約為 0.4 立方公尺，僅約為用過核子燃料直接處置體積之五分之一，詳如圖 3。

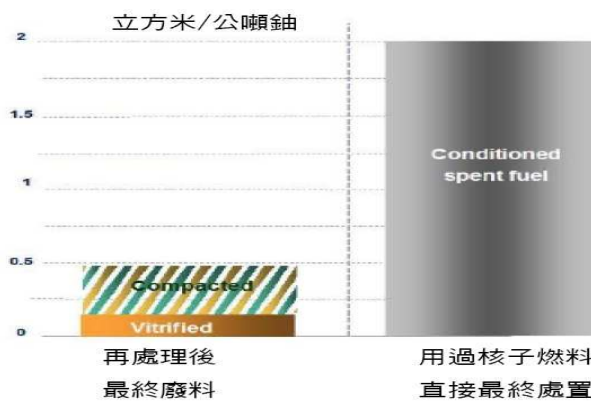


圖 3 用過核子燃料再處理後高放射性廢棄物體積

若將用過核子燃料直接進行深層地質處置，大約 20 萬年之後，其輻射強度才能降至天然鈾礦的水平。但是若以現行技術將用過核子燃料進行再處理，回收鈾、鈾後之高放射性殘留廢棄物，其輻射強度僅約 1 萬年，就可降到相同水平。與用過核子燃料直接地質處置相較，經再處理後產生之高放射性廢棄物的輻射強度及所含長半衰期核種數量大幅降低約 20 倍，可縮短達到環境背景值所需之衰變時間。

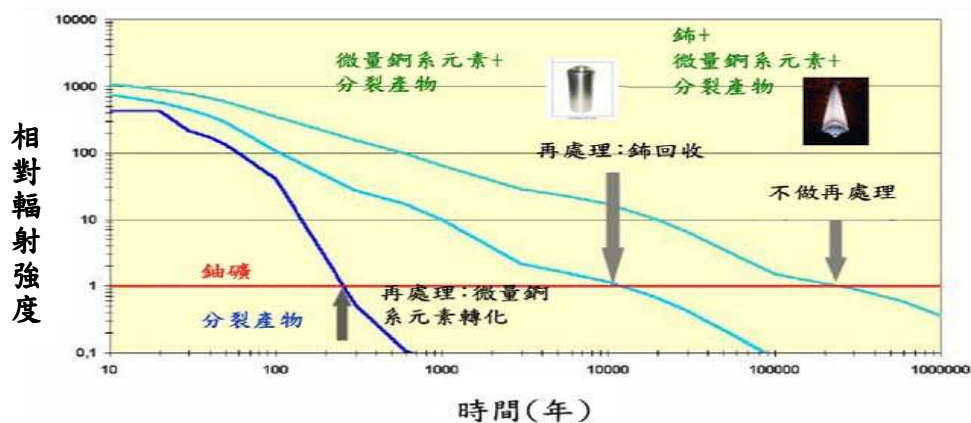


圖 4 用過核子燃料與再處理後高放射性廢棄物之相對輻射強度



用過核燃料再處理操作五程序：「用過燃料水池內儲放」→「將用過燃料切成小段管」→「溶解」→「萃取」→「玻璃固化」。

(1) 用過燃料水池內儲放：核電廠內用過燃料池儲放約 1~5 年，使其活度降低。

爾後再於用過燃料水池內儲放 2~4 年，持續降低活度；剛退出爐心之前幾年，用過燃料活度衰減非常明顯；活度降低後有利於後續之再處理操作的安全。

(2) 將用過燃料切成小段管：於切管前會先量取用過燃料之燃耗度，以確保後續的操作過程中不會發生異常的臨界意外，切管時會先將燃料上、下繫板部份切除，並倒入繫板之清洗槽；而後將燃料棒切成 35 毫米之小段管，並經輸料管使每一小段管掉入溶劑槽內。

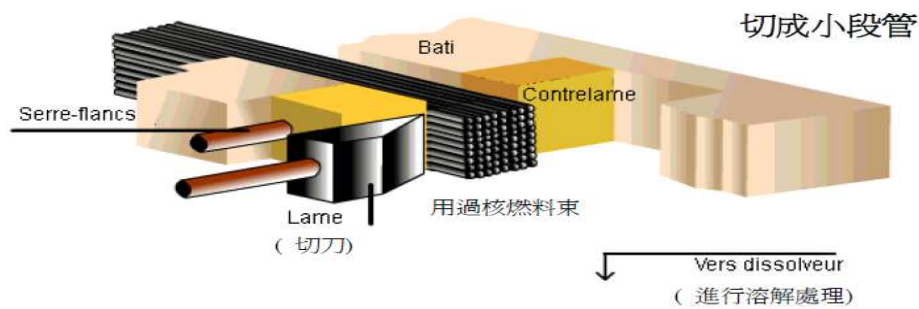


圖 5 切成小段管示意圖

(3) 溶解：操作包含下列步驟：①分離小段管殼及套頭部份；②溶解燃料丸及清洗小段管殼；③清洗套頭；④處理分裂氣體及回收硝酸；⑤澄清溶液；⑥移除細微顆粒；⑦量測各項成份。

溶劑槽內備有間格之轉盤，一次轉動 30° 使其能 8 個小時內連續運轉，經轉動攪拌後 2 個小時轉盤內之每一間格會陸續倒出其內含物，並經給料槽傾斜滑入清洗槽內。套頭部份經酸洗、水洗後，與管殼會同置入倉儲暫存，準備壓縮後裝桶（1995 年之前，採用水泥固化，之後使用 2500 公斤之壓扎器壓縮減容成原體積之 1/5），溶液部份批次式地餵入離心機內，分離成不溶解之顆粒部份及澄澈溶液。澄澈溶液之組成為鈾 200 克/公升，鈾 2.5 克/公升，硝酸 3.5 莫耳/公升及分裂產物 6~7 克/公升。

分裂氣體之處理分成下列步驟：①補捉住騰帶出之粉塵；②捕捉住硝酸氣，冷凝後置回硝酸溶液中，回收於溶劑槽內；③經液鹼噴灑槽捕捉碘核種，含碘之溶液經稀釋後，排入大海，以稀釋長半衰期之 I-129 核種活度。

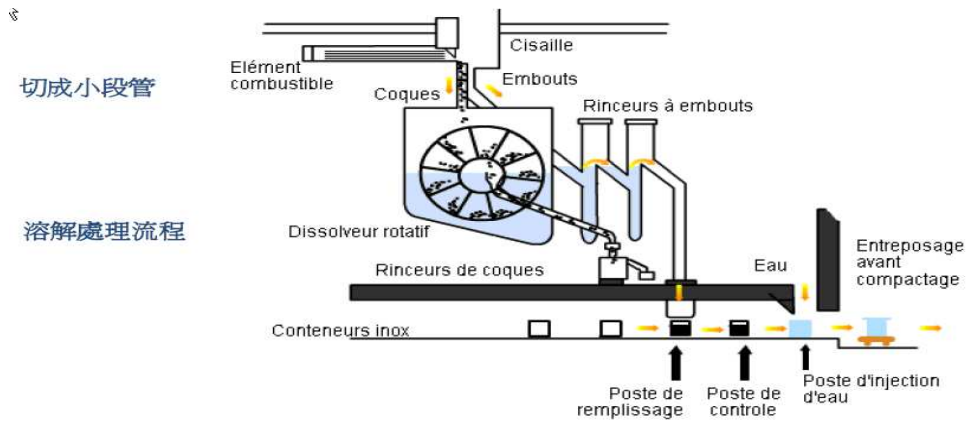


圖 6 溶解處理示意圖

#### (4) 萃取：

- ①第一道萃取為再處理程序之主要核心部份，此程序實現了分離可回收之物質，並予以純化（鈾及鈾）；此程序只使用單一的溶劑，由 TBP（三丁基磷酸鹽）稀釋於碳氫化合物溶劑中（類似煤油成份）。此溶劑屬商業型產品，易於市場上取得。

此分離階段分成兩個步驟，混合及澄析，於混合相時分裂產物之水溶液含豐富的鈾、鈾元素，並與有機相（TBP）攪拌形成乳化漿液。鈾、鈾親合於有機相內，分裂產物與鈾系元素則親合於另一相。（因此分離出鈾、鈾與分類產物、鈾系元素兩大類）。第二步驟為澄析分離之部份，重複此步驟多次而從 TBP 中萃取出鈾、鈾元素。

直至目前經從上一階段所萃取出鈾及鈾元素混合物中，再萃取出鈾元素，也就是使用還原之方法，使鈾溶入水溶液相中而分離出。最後之步驟為使用稀硝酸溶液萃取出鈾元素。

- ②第二道再萃取與第一道程序類似，最主要是要純化鈾及鈾元素，達到可回收製作新燃料的純度。使用之化學程序中亦是 TBP 此項溶劑。鈾元素將

轉化為硝酸鹽被純化回收，部份鈾被再次濃縮製成新燃料，部份則暫時儲放。鈾則會轉化成氧化物後製成 MOX 燃料。

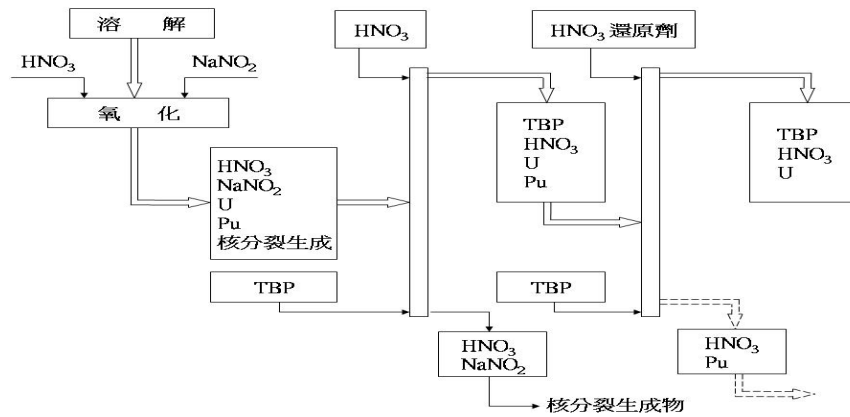


圖 7 萃取過程示意圖

(5) 玻璃固化：分裂產物與鈾系元素使用玻璃固化法，予以固化及穩定化處理（使物理及化學性質穩定）。此固化玻璃廢棄物約含 95% 之用過燃料總活性，且不帶有可回收之有用物質，即為真正的最終廢棄物。

玻璃固化廢棄物有下列之廢料源：① 經濃縮後之分裂產物溶液；② 經離心機分離出之顆粒型廢棄物；③ 各項工作溶劑中，再經濃縮之廢棄物。上述三項廢料源先被送往廢液飼入槽，並計算最佳之各項成份配比例，及玻璃添加劑之適當成份，使玻璃之熔融含封性達到最佳的效果。

當備好進料時，將上述流質之廢料飼入金屬鍛燒管，鍛燒管外側維持於 600°C，使管內流體廢料中硝酸鹽被高溫熱解，剩下被燒結之鈣石塊；鈣石塊與玻璃條基材（玻璃基材主要為氧化矽硼，鋁及鈉等成份）同時被倒入高於 1050°C 融爐內。熔爐填滿後，再經 12 個小時的連續高溫（高於 1050°C），使鈣石與玻璃完全均勻熔合；當熔合完成後，熔爐約有 200kg 的流體型玻璃廢棄物，後將被倒入一標準型不銹鋼筒中（180 公升裝），約二個批次可達適當的滿度（約 150 公升）。

150 公升之玻璃固化廢棄物內含約 84kg 之分裂產物及鈾系元素，相當於發電 360 百萬度所產生的廢料量。作成廢棄物桶成品後，須再自然冷卻

24 小時並確認表面無污染後，送至倉庫窖中暫存。最終將送回原用過燃料國家。

目前再處理之主要訴求在於減少欲最終處量之高放射性廢棄物之體積以利於最終處置場之規劃、選址、設計、及建造。截至 2014 年 9 月，世界各國的核能電廠約產生了 290,000 公噸的用過核子燃料，其中 90,000 公噸已進行再處理，其餘皆存放於臨時貯存系統或是各電廠內。國際上具有用過核子燃料再處理能力，且具備相當商業規模的國家有法國、英國、日本和俄羅斯。英法兩國過去提供西歐國家和日本許多再處理服務，俄羅斯則處理過芬蘭、烏克蘭、匈牙利和保加利亞等東歐國家的用過核子燃料。

## 二、拜會國家放射性廢棄物管理署（National Agency for Radioactive Waste (ANDRA)）



圖 8 ANDRA 總部及最終處置設施

### (一) 法國放射性廢棄物組織與背景相關簡介

由於法國境內鈾礦有限，為了能源的安全性策略與核廢料減容考量，法國的核能後端業務是採用再處理之燃料循環，用過核子燃料經過再處理後，再製造成 MOX (Melox Mixed Oxide, 鈾鈾混合) 燃料，於法國運轉之核能電廠再循環使用。法國的 58 部核能機組 (總裝置容量為 63GWe, 發電量高達 75%)

中，有 20 部是採用 MOX 燃料。法國為全世界使用核能發電比例最高的國家。福島事件發生後，法國採取持續使用核能，加強核能安全的策略。

目前，法國電力公司（EDF）每年產生 1,150 噸用過燃料，共產生 8.5 噸鈾（立即再循環成 MOX 燃料），及 815 噸之再處理鈾（reprocessed uranium）。再處理鈾中有 650 噸將轉換成穩定的氧化鈾以利於貯存。

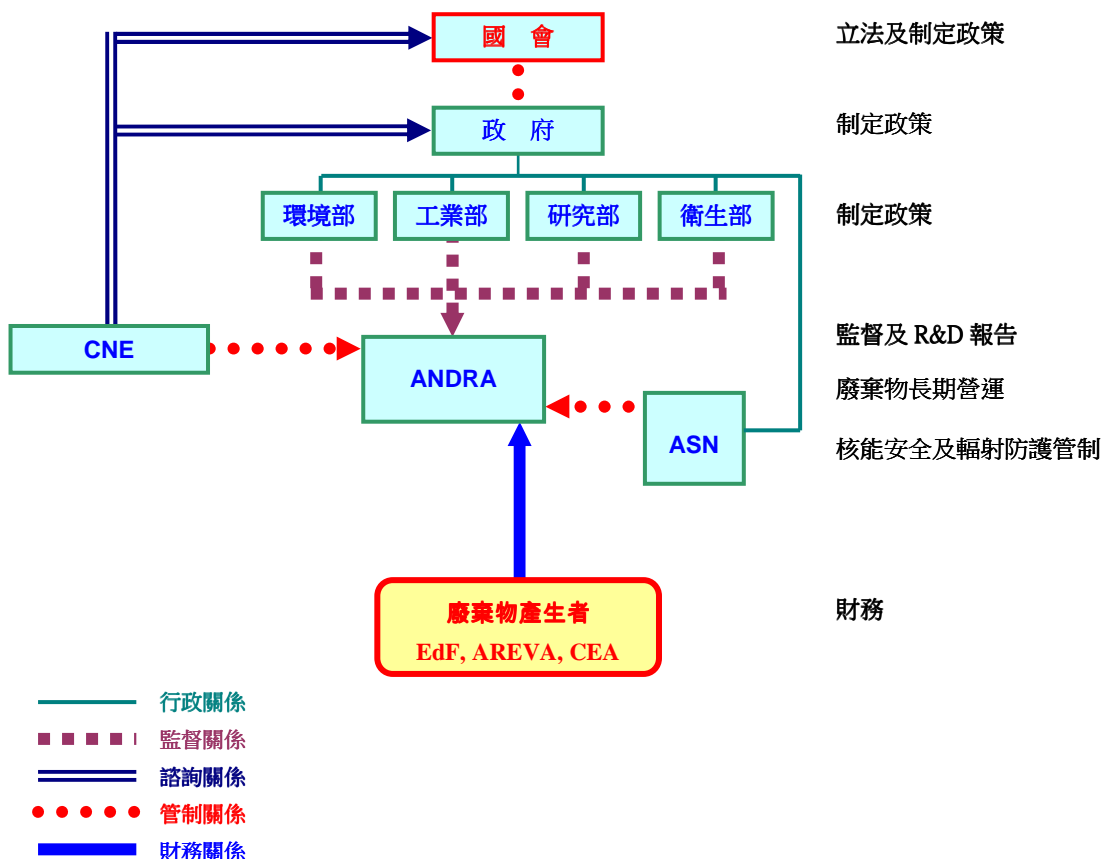


圖 9 法國的核能後端營運之組織架構

國家放射性廢棄物管理署（ANDRA）為法國的放射性廢棄物營運機構，是 1979 年 11 月 7 日根據法國工業部長、經濟部長及預算部長等所簽署的跨部命令，在法國原子能委員會（French Atomic Energy Commission（CEA））內部所成立之機構。1991 年 12 月 30 日通過的放射性廢棄物法（Waste Act）正式將 ANDRA 定位為法國的後端營運專責機構，負責法國的放射性廢棄物之長期營運，管理 3 個最終處置設施。

法國的核子安全主管機關原稱為 **DSIN** (核子設施安全署 (The Directorate for the Safety of Nuclear Installations ))，但於 2002 年 2 月改組稱為 **ASN** (核子安全機構 (The Nuclear Safety Authority))。ASN 是由核設施安全及輻射防護局 (DGSNR) 及八個地區分站組成。2002 年 2 月 22 日法國的內閣會議決議成立 **DGSNR**，合併已有的核子設施安全署 (DSIN)，健康總局 (DSN) 之輻射部門，游離輻射防護局 (OPRI) 之輻防管制部門及人造放射性元素跨部委員會 (CIREA)。DGSNR 在核子安全方面是由工業部及環境部共同督導，而在輻射防護方面則由衛生部督導。

國家評估委員會 (National Evaluation Commission (CNE)) 係根據 1991 年 12 月 30 日通過的廢棄物法而成立，是由國會及政府所指定的 12 位專家所組成。CNE 每年審查法國在高放射性廢棄物及低放射性廢棄物之相關研發計畫，然後向國會及政府報告。

表 1 法國放射性廢棄物之分類

	短半衰期廢棄物	長半衰期廢棄物
極低放射性 10 ~ 100 Bq/g	Centre de Morvillers (來自於核設施除役所產生的放射性廢棄物) (VLLW ; TFA)	
低放射性 <10 <sup>5</sup> Bq/g	Centre Aube (來自於核電廠廢棄物)	目前規劃中，預計 2019 運轉 (石墨、鏷，由於拆除石墨緩和劑之氣冷式電廠所產生)
中放射性 <10 <sup>8</sup> Bq/g	+ Centre Manche (LILW-SL ; FA/MA-VC)	
高放射性 >10 <sup>9</sup> Bq/g	來自於再處理廠之廢棄物 (研究期間：1991~2006) 最終處置場 (Cigéo geological disposal facility) 預計 2025 年運轉 (HLW ; HA)。	

註：1.半衰期分類：(1) 短半衰期：半衰期短於 30 年。(2) 長半衰期：半衰期長於 30 年。

2.長半衰期低放射性廢棄物，正在規劃深度在 15 公尺以上的地表下處置設施。

根據法國的安全規則，處置設施應設計成多重障壁系統以密封放射性廢棄物所含之放射性核種。多重障壁系統包括廢棄物包裝、工程結構及場址之地質構造等。安全規則所規定的場址選址準則著重於地震，大地構造 (tectonic)，地工穩定性，及水地質學 (hydrogeology)。處置設施之壽命分為三個時期：(1) 建造及運轉時期；(2) 運轉後的 300 年監管期；(3) 場區活動解除限制期。

表 2 法國對於用過核子燃料循環和高放射性廢棄物之處置策略概況

燃料循環策略	權責機構和最終處置場之推動進程
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 密閉式燃料循環。</li> <li>• 所有 GCR 燃料在 Marcoule 再處理廠進行再處理，該廠目前正進行除役。</li> <li>• 在 La Hague 設有兩座再處理廠 UP2 及 UP3。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 在黏土和花崗岩層中建立地層研究室</li> <li>• 2006 年國會通過以深層地質處置，貯存筒為可再取出回收設計</li> <li>• 黏土層處置場為合適場址，預計 2015 年取得執照，2025 年營運</li> </ul>

## (二) ANDRA 組織架構

國家放射性廢棄物管理署 (ANDRA) 為法國的放射性廢棄物營運機構，是 1979 年 11 月 7 日根據法國工業部長、經濟部長及預算部長等所簽署的跨部命令，在法國原子能委員會 (French Atomic Energy Commission (CEA)) 內部所成立之機構。

1991 年 12 月 30 日通過的放射性廢棄物法 (Law No. 91.1381 of 30 December 1991，又稱為 Bataille law)，該法指出高階放射性廢棄物處理三條路徑：(1) 由 CEA 負責高階放射性廢棄物隔離及轉化的研究。(2) ANDRA 藉由建造/運轉地下實驗室方式，進行高階放射性廢棄物深層地質處置可行性評估。(3) 由 CEA 負責高階放射性廢棄物處理及貯存技術研發。該法正式將 ANDRA 定位為法國的後端營運專責機構，負責法國的放射性廢棄物之長期營運。受能源部、環境部及研究部之監督。

ANDRA 任務包括如下：(1) 負責小產源放射性廢棄物 (醫院、研究實驗室、大學院校及個人) 之處理。(2) 運轉位於 Aube 地區的 2 座中低階放射性廢棄物最終處置場。(3) 監管已封閉之 Manche 中低階放射性廢棄物最終處置場。(4) 研究及設計尚未進行處置之長半衰期低中高階放射性廢棄物的永續營運方案。(5) 應私人或公家機關要求，就之前受核污染場址環境復原。(6) 活動及資訊公開透明。(7) 根據安全法規訂立放射廢棄物固化及處置之規範。(8) 建立法國放射性廢棄物產量資料庫並出版法國國家放射性物料及廢料清單。

ANDRA 設董事會、執行長及副執行長。員工約 650 人，下設 10 個部門（4 個管理及溝通部門、6 個技術及業務部門），3 個最終處置設施（封閉監管中之中低階放射性廢棄物最終處置場（Manche）、營運中之中低階放射性廢棄物最終處置場（Aube）、營運中之極低階放射性廢棄物最終處置場（TFA））。除行政管理等後勤支援部門外，ANDRA 主要業務執行部門包括：營運部（下轄 3 個最終處置設施）、研發部、風險評估部及國際事務部。

ANDRA 為了提升整體營運管理及跨部門間橫向聯繫之需，另成立 11 個任務編組型之內部委員會如下：（1）指導委員會（Directorate Committee）。

（2）企業參與委員會（Engagement Committee）。（3）安全指導委員會（Safety Committee）。（4）策劃委員會（Projects & Programmes Committee）。（5）地方協助委員會（Sponsorship Committee）。（6）智財委員會（Intellectual Property Committee）。（7）編輯委員會（Editorial Board）。（8）ANDRA 報刊委員會（ANDRA's Newspapers Committee）。（9）資安委員會（Information Security Systems Committee）。（10）環境健康安全審查委員會（Safety-Health-Environment Review Committees）。（11）環境安全品質管理審查委員會（Quality/ Safety/ Environment Management System Review Committee）。

### （三）低放射性廢棄物最終處置計畫

低放射性廢棄物問題的解決之道在於興建處置設施將廢棄物埋藏於地下，藉多重防護措施，安全地隔離放射性廢棄物於人類生活環境之外，此種處置方式已獲國際原子能總署之認可與推薦，目前營運中的處置場計有 77 處，分屬 34 個國家，顯見在技術上並無困難。低放射性廢棄物最終處置的方式，一般可分為陸地掩埋與海拋兩種，但依 1983 年倫敦公約之規範，各國同意暫時停止海拋，目前各國已運轉或規劃中的低放射性廢棄物最終處置場，均採陸地處置方式。也就是將廢棄物埋藏於地表或地下，使其與人類生活環境隔絕。



陸地處置可分為淺層處置與地質處置，淺層處置是將廢棄物放置於地表上或地表下最深不超過 30 公尺處的處置方式；地質處置則是將廢棄物放置於較深的岩層中，包括隧道處置及海床下處置。

低放射性廢棄物處置方式的選擇，必須配合當地自然、社會、環境與廢棄物特性等進行通盤考量，所以各國採取的作法不盡相同。目前法國、美國、日本、瑞典、英國、西班牙、德國及芬蘭等國家，都已興建低放射性廢棄物最終處置場，且順利運轉中。各國的處置方式雖因本身條件而異，但都能做到將低放射性廢棄物與人類生活環境隔離，以保障大眾安全，維護環境品質。

### 1.低放射性廢棄物來源與特性

(1) 來源：低放射性廢棄物主要是來自電廠運轉期間受污染的衣物工具及廢棄的零組件、設備、廢液殘渣、廢樹脂等。核能電廠以外小產源所產生之廢棄物，係由專業單位負責接收處理。其服務的對象包括有醫院、工廠、學校、研究機構等，所接收的廢棄物包括廢射源、廢液、塑膠廢棄物、鉛罐、過濾器、壓克力、保麗龍及廢紙等。

(2) 特性：放射性廢棄物之輻射強度會隨著時間的增加而遞減，以鈷-60 核種為例，它的半衰期約為 5.3 年（也就是經過 5.3 年，其活度減為原來的一半），經過 50 年後約已衰減至原來之千分之一，若再經 50 年，則其放射性活度將降為原來的百萬分之一，可以說其放射性已衰變殆盡。低放射性廢棄物內所含放射性核種以鈷-60 為大宗及少量的銻-137，故經 300 年後，絕大部份的放射性將自然消失得無影無蹤。

### 2.管制措施

低放射性廢棄物最終處置場的設計，世界各國皆採「多重障壁」的概念，也就是利用多項的防護措施，隔絕放射性廢棄物於人類生活環境之外。這些多重障壁包括低放射性廢棄物固化體、廢棄物容器、填充材料、工程設施、排水設施等工程障壁及天然障壁等。

### 3.法國低放射性廢棄物最終處置場案例

法國採用多重障壁概念之淺層處置來處置其低放射性廢棄物，已先後完成兩座處置場，即 **Manche** 處置場及 **Aube** 處置場。前者於 1969 年開始運轉，使用 25 年後於 1994 年 6 月封閉，同時進行處置場的覆土及綠化工作，於 2003 年取得封閉後監管之執照，邁入 10 年積極監管期。由於 **Manche** 處置場的容量有限，**ANDRA** 從 1985 年即公開徵求低放處置場址，經由自願場址方案，由地方的市長提出申請，政府則給予一定的經濟及社會回饋做為回報。**ANDRA** 從原先的 5 個候選場址中評選，最後由位於法國東北地區的盧伯縣勝出。**ANDRA** 於是在 1992 年建造完成 **Aube** 處置場，接替 **Manche** 處置場（目前已貯滿封閉關場），接收來自全國各界產生的中低放射性廢棄物的處置，**Aube** 設計處置容量為 100 萬立方公尺，其營運年限為 50 年。

負責營運的法國國家放射性廢棄物管理局（**ANDRA**）從 **Aube** 處置場初期規劃開始，即持續不斷地參與社區活動，不只與當地政府及附近民眾打成一片，也使該處置場成為學習地球科學與環保的示範場所。

表 3 法國中低放射性廢棄物處置現況

處置場（開始運轉）	廢棄物種類/容量	型式	現況
<b>Aube</b> （1992）	中低放射性-短衰期/1,000,000m <sup>3</sup>	<b>ENSF</b>	運轉中
<b>Manche</b> （1979）	中低放射性-短衰期/527,000m <sup>3</sup>	<b>ENSF</b>	1994 年關閉
<b>Morvilliers</b> （2003）	極低放射性-短衰期/650,000m <sup>3</sup>	<b>SNSF</b>	運轉中

註：ENSF：工程化近地表設施、SNSF：單純近地表設施

#### （四）高放射性廢棄物最終處置計畫

##### 1.法國高放射性廢棄物最終處置場沿革

1991 年制定的高放射性廢棄物研發法案提出 15 年期的研究方案，重點包括：（1）由法國原子能委員會（**CEA**）進行廢棄物中長半衰期核種分離及轉化技術的研究。（2）由 **ANDRA** 透過建造地下研究試驗室，進行深地質處置研究。（3）由 **CEA** 進行長期地表貯存技術開發。該法案同時授權任命一位協調官，展開地下試驗室場址的徵詢工作。其任務目標主要為：向公眾提供資訊、公開對話、協助做成決策。

選址工作從 1993 年開始，最初有 30 個地區在當地民意機關支持下，提出自願成為候選場址，經研判後，最後剩下 3 個候選場址。分別是：在東北地區跨默茲（Meuse）及上馬恩（Haut Marne）縣的黏土屋布爾（Bure）場址，在南部加爾（Gard）縣馬庫爾核能設施附近的黏土屋，及在西部維恩（Vienne）縣的花崗岩層。

緊接著就在上述場址進行地表調查，以及鑽 2-4 個探測孔進行地質測量；1996 年 5 月政府授權 ANDRA 針對上述 3 個場址提出設置及運轉地下試驗室申請，期間曾經過當時的核能管制單位（DSIN）及研究部共同審查，並辦理公聽會、地方徵詢，最後由地方投票，結果 3 個地區均同意接受 ANDRA 的地下試驗室計畫。

1998 年 12 月，法國政府進一步確認僅保留 1 個黏土屋及花崗岩進行後續研究，接著於 1999 年發布行政命令，同意 ANDRA 在布爾場址建造地下試驗室及地方諮詢中心；至於花崗岩則因地方又出現雜音，未能再進一步確定具體的場址位置；不過政府轉而要求 ANDRA，參與國際上花崗岩層的研究試驗室，以補足這方面的知識。依法國法律規定，地方政府基本上對公共建設案並沒有否決權。

為便於與地方的互動，法國政府依 1991 年的法案授權，設立一個地方資訊及監督委員會（CLIS）。該委員會由中央政府、省及市鎮長與地方各級議會、環保團體、工會及 ANDRA 代表共同組成。CLIS 在決策過程是一個必須被徵詢的組織，並不具決策權，但依法所有會影響地方及環境的運作事項，均須向 CLIS 提出報告。

與 CLIS 同時依法設立的另一個地方組織是公眾關注團體（Public Interest Group，GIP）。依法 GIP 的任務為：（1）經營與推動或協助地下試驗室或處置場運轉有關的設備或設施。（2）在所屬行政區域內進行區域規劃及經濟發展活動。（3）支持與地下試驗室及新能源技術有關的訓練計畫，並傳播相關的科學與技術知識。

法律規定 ANDRA 必須於 2015 年前完成相關測試及技術開發，並提出處置場設置申請，以便政府審核。

ANDRA 位於 Bure 的訪客中心，除一般性的展覽空間外，還不惜鉅資另外建造原尺寸的數十公尺長的地下隧道，以及一整套高放廢棄物貯存罐輸送操作設備，方便向民眾解說，同時展示其成熟的技術。透過親身經歷，無形中建立了民眾對政府的信心。

## 2.Meuse/Haute-Marne 地下研究實驗室

ANDRA 於 1999 年 8 月建立 Meuse/Haute-Marne 地下研究實驗室，其地面景觀如圖 10 所示。此實驗室位於 490 公尺深處之矽質黏土岩（argillite）層，此矽質黏土岩已有 1,500 萬年歷史，被稱為 Callovo-Oxfordian 構造。從 2004 年起，ANDRA 開始在豎井及 100 公尺之橫坑進行 Callovo-Oxfordian 之直接調查及現地試驗。經過多年的研究，ANDRA 取得足夠數據判斷 Meuse/Haute-Marne 場區之 Callovo-Oxfordian 構造是適合進行高放射性廢棄物之最終處置。其矽質黏土層之浸透性非常低，且均勻分佈在很大之區域。同時平均深度達 500 公尺，不受斷層影響，因此其地震危險度很低，且因深度夠而不受未來氣候變遷之影響。

未來進行處置時廢棄物之包件有兩種：中放射性廢棄物（B 類廢棄物：泛指用過燃料再處理後之技術核廢料筒）將盛裝在混凝土容器內，高放射性廢棄物（C 類廢棄物：泛指用過燃料再處理後之玻璃固化廢料筒）。若在 Callovo-Oxfordian 構造進行處置，則處置設施將位於 Callovo-Oxfordian 構造中間之單一層面，且根據包件型式分成幾區，並以 250 公尺之矽質黏土岩來隔開。法國的高放射性廢棄物最終處置設施以黏土層為介質之示意圖分別如圖 11。



圖 10 法國 Meuse/Haute-Marne 地下實驗室之地面景觀

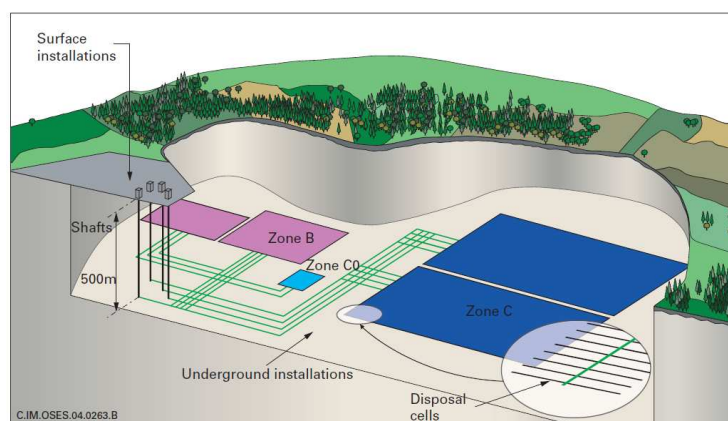


圖 11 法國的高放射性廢棄物最終處置設施示意圖(以黏土層為介質)

ANDRA 於 2005 年證明 Meuse/Haute-Marne 地下實驗室周圍的 250 平方公里可進行深地質處置之可行性。ANDRA 曾在 2009 年諮詢當地之利害關係人對此計畫之看法，他們均認為安全相關準則為首先要考量之因素。他們也期望此計畫能與地方整合及促進區域發展。ANDRA 於 2009 年底向法國政府建議所需之 30 平方公里區域，此區域位於最安全的邊界內(岩石厚度達 140 公尺以上)，且有低的水力頭梯度 (hydraulic head gradients)。此計畫已被法國國家評估委員會 (National Assessment Board)、ASN、ANDRA 之科學委員會及地方地下實驗室之資訊暨監督委員會核准。此深地質處置設施亦將含廢棄物接收及再玻璃化 (必要時) 之地面設施。2009 年 ANDRA 曾提出幾個可作為地面設施之區域。

ANDRA 在 2009 年向法國政府提送之報告中亦包含未來處置設施建造及營運之方法，此包含詳細的地下設施佈置，廢棄物包件之傳送、置放及再取出程序等。ANDRA 並曾在地上及地下實驗室進行技術研究及測試，而在 2009 年申請四項專利。

ANDRA 於 2014 年向法國政府出示一份深層地質處置的規劃藍圖，如果該計畫在 2016 年獲得法國國會批准了，該深層地質處置場將於下一年開始施工建造。然後，法國國會將會進行考量發給該地質處置場營運執照，俾允許它在 2025 年開始營運。

熔融狀的玻璃混融物將被倒入不銹鋼製容器內，然後放置在鋼筒中。在 Bure 處置場的自動化機具會把這些鋼筒推進到直徑 70 公分被稱為肺泡（alveoli）的鑽孔裡處置，這些肺泡是以水平方向來鑽孔其深度達 40 公尺，並分佈在坑道主要通道的牆上。同時，來自於核反應器使用過的相關設備與試劑之中階放射性廢物，將被壓縮成圓餅狀並堆擠進鋼製容器，然後被混凝土包封在鋼筒中，最後亦將被處置於坑道內。

高階放射性廢物的體積遠遠小於中階放射性廢物，但它們將需要有兩倍的處置空間，因為其具有較熱溫度的鋼筒必須隔以一層空的隔間來放置之，以避免過熱。

在 Bure 的研究已基本上確認，處置的岩石層是均勻的，對水的移動具有高度的不透水性，沒有斷層也沒有地震的風險。在地面上，研究人員正廣泛地在場址周圍 250 平方公里區域的環境中進行採樣與分析，包括空氣，水和土壤中的樣本，以便取得一個全面的環境數據基準。Bure 實驗室與法國的農業研究機構（INRA）共同設立了一個環境觀測站，並將對這個生態系統進行至少一個世紀之監測。

### 3.Cigéo 計畫

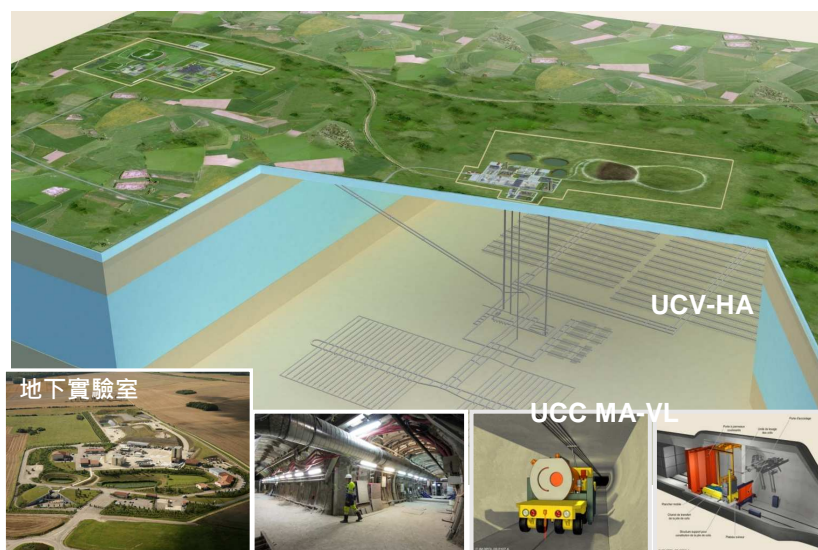


圖 12 Cigéo 計畫現況

Cigéo 計畫將於法國東部之 Meuse/Haute Marne 地區 (ANDRA 已於 1999 年在此處建立 Bure 地下試驗室)，深度 500 米處建造一深層地質處置場，法國法律並要求此處置場的設計需在 100 年後可再取出。地面設施面積預計佔地約 300 公頃，地下總處置面積將達到 15 平方公里，該處置場在封閉前預計營運 85 年。2015 年 ANDRA 將提送運轉及處置的主計畫以及安全性功能、可再取出功能予政府。預計 2017 提出申請，2020 年開始建造，2025 年開始小規模先導處置。

#### (1) Cigéo 計畫時程：

2010-2012 年：在 30 平方公里之限制區域內進行地質調查，且研究地面設施之佈置方案。

2013-2014 年：就所選定之場址進行公開辯論。

2016 年：根據新法規決定深地質處置再取出之條件。

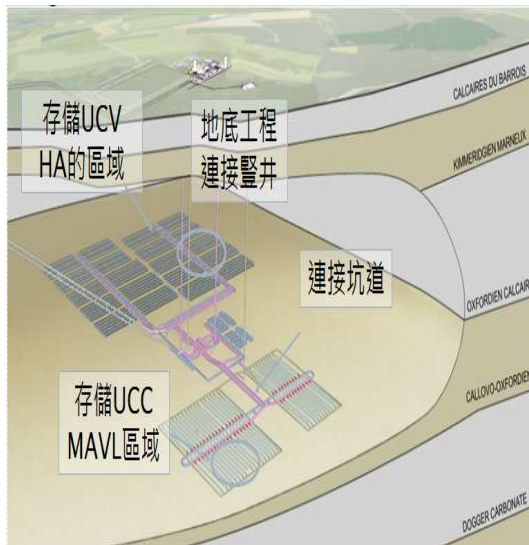
2017 年：提送處置場之執照申請。

2020 年：在取得相關執照後，開始興建最終處置設施。

2025 年：最終處置設施開始運轉，預計將持續 85 年。

(2) 可逆深地處置解決方案 Cigéo 設計參數

圖



- 地下面積：大約 15 到 20 平方公里
- 運輸隧道+處置坑道總長度：390 公里
- 4 豎井：長度約為 570 公尺
- 斜坡：2 坡道，從 10%到 12%的斜率、長度約為 5000 公尺
- 運輸隧道：100 多公里
- UCC MAVL 處置坑道：50~60 個、250~400 公尺長度
- UCV HA 水平處置坑道：大約 6000 個、40 公尺水平處置坑道
- 挖掘：7-8 百萬立方米、40%再利用回填

13 Cigéo 規劃示意圖

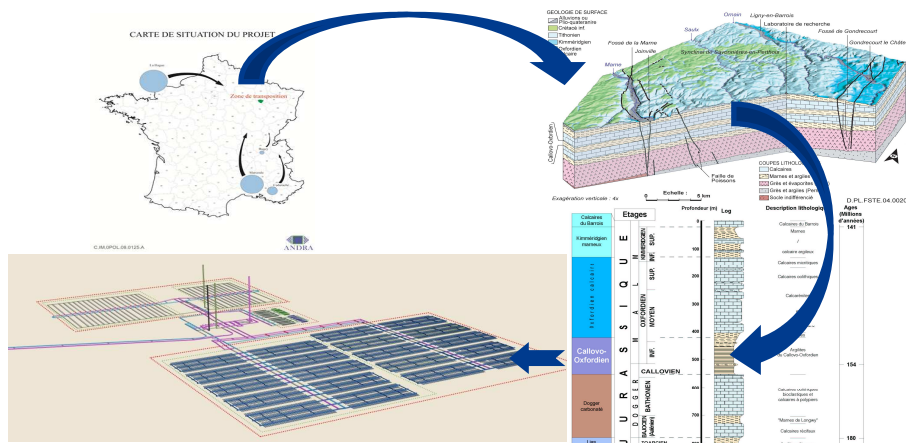


圖 14 500 公尺泥岩層（收納 CEA & La Hague 高放廢棄物）

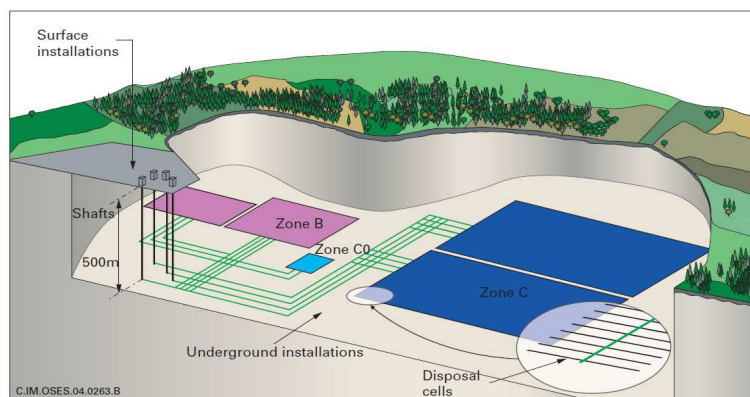
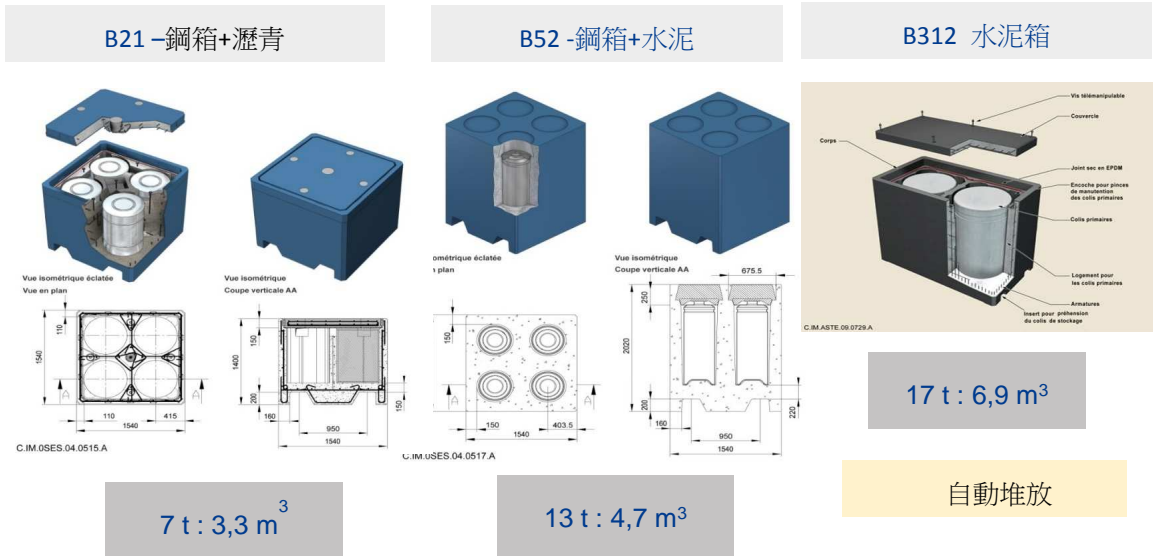


圖 15 Cigéo 深層處置 B 區（UCC）& C 區（UCV）





高性能混凝土 (BHP 60 à 90 MPa)

圖 16 UCC 包封容器設計概念

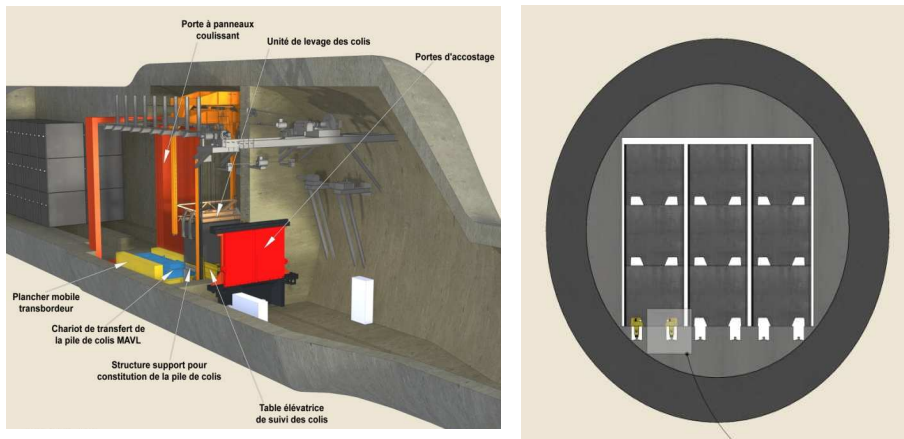


圖 17 UCC MAVL 處置坑道設計概念

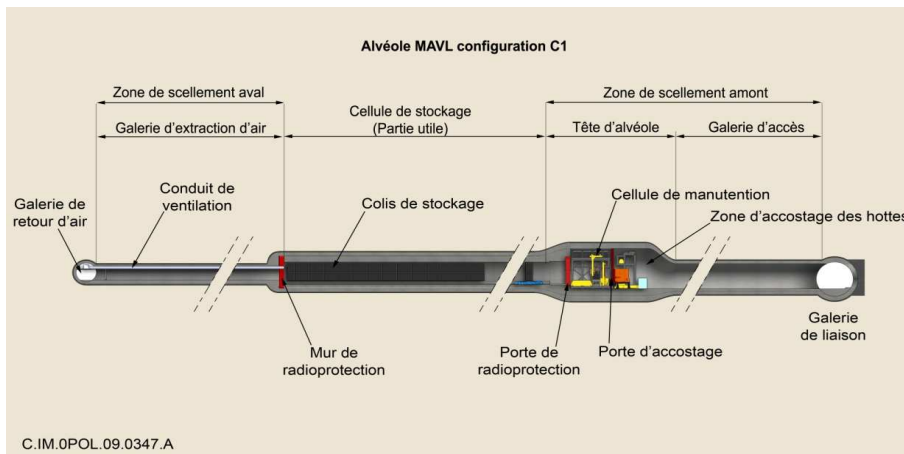


圖 18 UCC MAVL 處置坑道

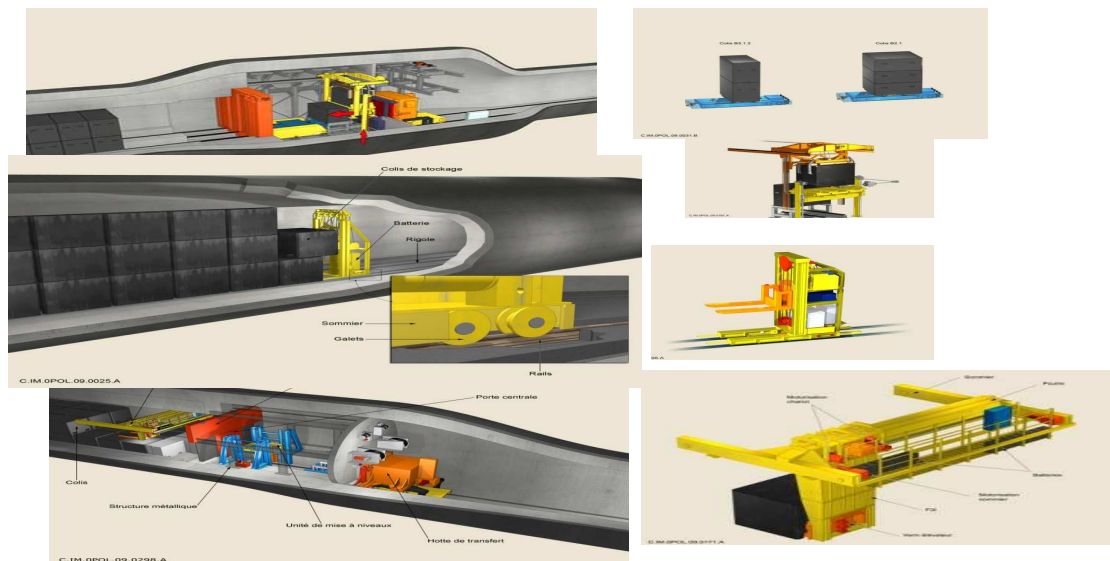


圖 19 UCC MAVL 處置坑道堆放設計草案



圖 20 玻璃固化物包封容器 HA 概念

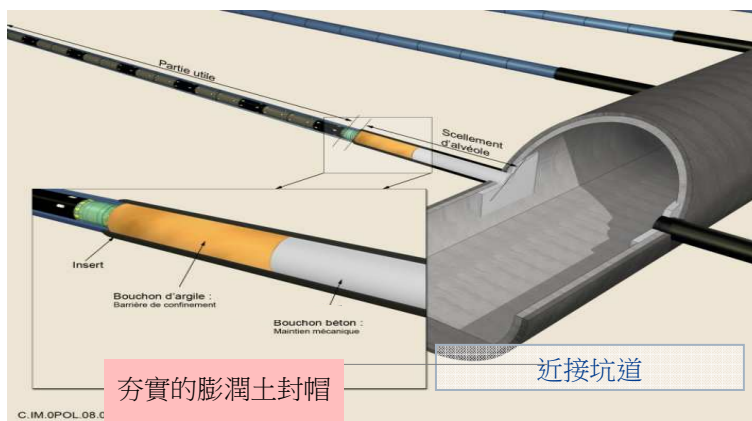


圖 21 UCV HA 水平置放坑洞

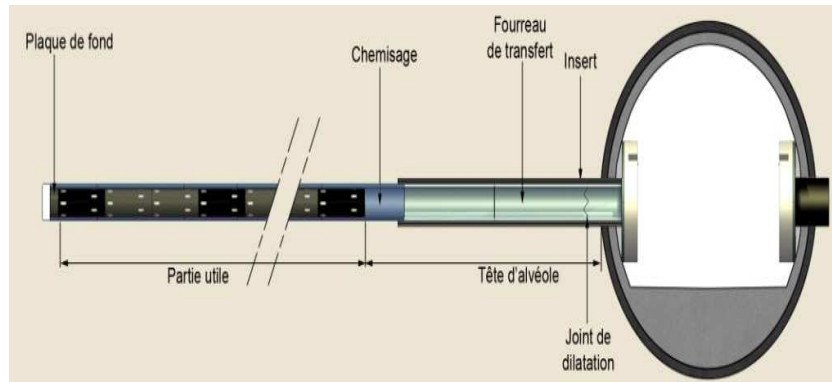


圖 22 UCV HA 水平置放坑洞

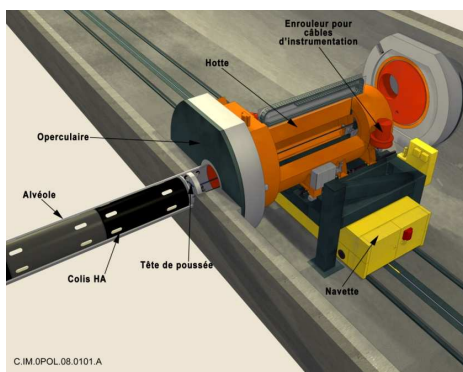


圖 23 UCV HA 包封容器堆放處理器測試

### 三、參訪 Aube 低放射性廢棄物最終處置場

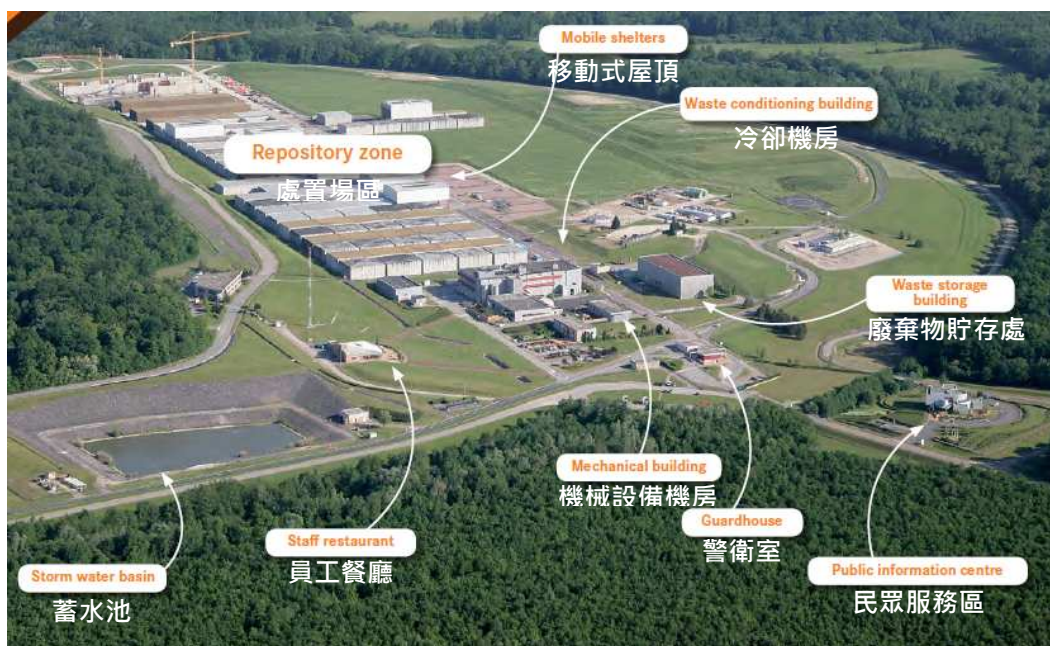


圖 24 Aube 最終處置場全景

因 Manche 處置場的容量有限，ANDRA 於 1985 年公開徵求中低放處置場址，以自願場址方案，由地方市長提出申請，政府給予一定的經濟及社會回饋措施。ANDRA 自 5 個候選場址中評選，最後由位於法國東北地區的 Aube 勝出。ANDRA 於 1992 年完成 Aube 處置場(簡稱 CSFMA)建造，以接替當時即將貯滿的 Manche 處置場，接收來自全國各界產生的中低放射性廢棄物的處置。

Aube 處置場位於巴黎東方 250 公里處，海拔 160 公尺之森林內，處置場周圍為森林環繞，場區範圍 95 公頃，其中 30 公頃作為處置設施使用，另開設一條 4 公里的專用道路以連接主要快速道路。有一條溪穿越過場址，其周圍 20 公里半徑內有天然泉、水庫及古蹟等。

此處置場之地質組成為在一黏土障壁上覆有一透水的砂組成。整個處置設施結構是位於地下水位之上。處置場對於每一主要貝他/加馬放射性元素訂定有一接收上限，而對於長半衰期之阿爾伐發放射性元素，亦訂定有一接收上限。Aube 處置場為淺地層之處置設施，接收之放射性廢棄物是以金屬桶或混凝土箱盛裝，廢棄物包件放置於混凝土結構物處置，以多層蓋板設計來防止處置區域在運轉期間的雨水滲入。Aube 處置場之輻射劑量限值如下：(1) 運轉階段：對於運轉人員為 20 毫西弗/年，對於一般大眾為 1 毫西弗/年。(2) 封閉後階段：考量最可能之情節下，對一般大眾為 0.25 毫西弗/年。

Aube 處置場共建造 400 個處置單元，總處置容量約 1 百萬立方公尺，分 400 個混凝土庫，設計採用多層障壁（單元包封、混凝土建築、天然地質）概念，該場將持續運轉 50 年，監測 300 年，自 1992 年 1 月啟用運轉迄今，截至 2013 年底共處置 280,171 立方公尺放射性廢棄物。由 2013 年所接收廢料分析：其中約 68%源自電力公司 EDF、18%來自研究機構 CEA、13%來自 AREVA 再處理作業，餘 1%為其他小產源。

負責營運的法國國家放射性廢棄物管理局（ANDRA）從 Aube 處置場初期規劃開始，即持續不斷地參與社區活動，除了重修歷史古蹟、建設學校及公共建設外，亦參與辦理青少年活動、推動與當地大學之建教合作、並資助各種教育訓練、

獎助運動等項目，不只與當地政府及附近民眾打成一片，也使該處置場成為學習地球科學與環保的示範場所。



圖 25 中/低處置窖、移動屋頂負壓窖和雨水收集池



圖 26 Aube 最終處置場運轉情況



圖 27 低放射性廢棄物桶運抵 CSFMA 之接收情形

#### 四、參訪 Manche 低放射性廢棄物最終處置場

Manche（簡稱為 CSM）位於法國西北部諾曼第半島頂端的 La Hague Plateau，佔地 15 公頃，位處 AREVA La Hague 用過核子燃料再處理廠旁邊，是法國第一個中低階放射性廢棄物最終處置場。法國早在 1960 年代開始尋找中低放射性廢棄物最終處置場，經過詳細的場址調查後，於 1967 選出位於 Manche 的處置場，並由法國原子能委員會（CEA）全權負責。CEA 於 1979 年成立法國放射廢料管理局（ANDRA）負責放射性廢棄物營運工作，同時管理該處置場。

處置場於 1969 年開始接收低放射性廢棄物，於 1994 年貯滿後關閉，25 年運轉期間共處置 527,225 立方公尺低放射性廢棄物，其中最多來自法國電力公司為 253,947 立方公尺、來自 AREVA 公司為 97,248 立方公尺、來自原子能署 CEA 為 145,190 立方公尺、其他研究機構、國防機構及醫院之低放射性廢棄物為 30,840 立方公尺，自 2003 年 1 月正式進入監管期，目前持續環境監控（尤其是水進出之監控）。根據法國國家放射性廢棄物管理局（ANDRA）之說法，Manche 處置場是全世界第一座結束運轉執照開始進入長期監測狀態之最終處置場。

Manche 處置場早期只以金屬桶簡單包裝、置入壕溝，因當地環境及土地穩定問題，該場曾於 1976 年環境監測時，在聖海倫河附近發現氚（Tritium）活度異常，引起普遍注意，也因此 CEA 在 1979 年於其組織內部成立國家放射性廢料管理局 ANDRA，接管 Manche 處置場，同時進行訂定接收標準、強化場區環境監測、改善壕溝設施（採多重工程屏蔽）等作為。其多重工程屏蔽，係指以多重阻隔障礙覆蓋廢料桶，由上而下分別是 Top soil, clay/sandstone, sand, bitumen, sand, clay/sandstone。Top soil 上鋪著綠草，並設有水泥的排水溝，避免雨水直接與廢料桶接觸。

Manche 處置場目前由 11 名工作人員維持監管期作業，持續進行環境監控，包括地下水、環境劑量、空氣監測以及雨水控制設備、處置設施邊坡穩定。每年採集 10,000 個環境樣本（包括水、空氣、蔬菜、草），由認證合格實驗室量測，以確保符合法規的要求，並用以評估環境的安全、監測異常狀態或發展等。監測

作業接受法國主管機關（ASN）管制。監管期特別注重雨水與處置場覆蓋設施的引流，監管報告顯示，造成民眾年劑量小於 1 微西弗。依據規定，1997 年至 2008 年成立特定監測與資訊委員會，以處理公眾監測訊息，而後則依據 2006 年 6 月 13 日之 2006-686 法及 2008 年 3 月 12 日之 2008-251 法令，於 2009 年成立地區資訊委員會（local information committee）接手公眾訊息事務。地區資訊委員會由總理事會主席授權，成員包括民選官員、行政部門代表、協會組織代表等。處置場監管期 300 年，相關資料須以紙本記錄永久保存。



圖 28 Manche 處置場廢料桶處置情形及全景

#### 肆、心得及建議

- 一、為解決核廢料問題，法國在 1979 年成立國家核廢料管理局（ANDRA）。該局為獨立運作之專責機構，負責規劃、興建及營運法國的高階、低階核廢料處置工作。法國除了已成功營運兩座低階核廢料處置場外，更是已規劃高階核廢料處置場的國家，預定於 2025 年開始啟用。法國解決核廢料議題的發展模式及組織運作體系，可作為我國未來成立專責機構之參考。
- 二、目前數個歐洲國家、俄羅斯和日本以再處理技術為用過核子燃料處理策略方向。再處理方式為將用過核子燃料所含的約 96%可再利用的鈾、鈾元素經由再處理程序回收製成新的核子燃料（MOX 燃料），相當於可減少三分之一的天然鈾礦需求，同時也增加了能源供給的安全性，剩下的廢棄物經由玻璃固化後貯存，再放入深層地質處置。
- 三、法國低放處置在技術上採用多重障壁概念的淺層處置，來處理低放射性廢棄物。法國國家廢棄物管理局 ANDRA 會將每季在處置場與其周圍環境所量測到的結果發行紙本，包括雨水、地下水、地表水、植物與大氣的經常性分析，並持續告知民眾這些量測結果。
- 四、低放射性廢棄物處置場所需土地面積小，處理及處置技術已相當成熟，此可從多數先進國家的相關經驗獲得實證。只要加以嚴格的監督管制，處置場不會對附近居民造成任何健康危害。
- 五、深層地質處置法藉助多重障壁的觀念，將用過核子燃料或高放射性廢棄物置於地表下數百公尺或更深處（如：法國深地層貯存處置，將高放使用過核燃料深地層貯存處置於粘土層約 500 公尺的深度。），以處置場所在之天然母岩，以及包括固化廢棄物、廢棄物包封容器、回填材料、處置場工程結構體等之工程障壁，永久阻滯放射性核種之遷移，使其不影響人類之生活環境。
- 六、法國為確保最終處置場的資訊代代相傳，透過將備份資料存放在國家檔案局，並邀請在地民眾化身監督的一份子，讓記憶不只在官方，也在每一位老百姓的心底。



七、法國 2006 年通過「放射性廢棄物永續管理計畫法案」，將「可逆性」的處置原則入法，要求現階段用過核子燃料在經過掩埋後，仍可順利取出，不會有輻射外洩疑慮，以便子子孫孫可重新做決定。