

10、應變方案

世界各國在推動高放射性廢棄物(含用過核子燃料)最終處置計畫時，均採階段式(stepwise approach)的方式來進行，以期妥善進行計畫的推動、提昇民眾的接受度並保留決策的彈性(IAEA, 2011；OECD, 2013a)，我國的最終處置計畫亦參照此精神來規劃，根據各國發展經驗顯示，在最終處置設施場址的選定過程中，技術與經費均非成敗的關鍵，主要的關鍵在於場址所在地的民眾接受度。因此，國際間相關計畫的推展，均必須面臨計畫敏感性所產生的不確定性因素，亦均歷經規劃工作及期程的修改，在實際執行上，均審時度勢，以務實的態度，盡力達成妥善處置放射性廢棄物的終極目標。考量我國用過核子燃料最終處置計畫時程規劃無法順利推展之情況可能發生，宜有其他應變方案因應，未來該計畫進度無法如預期於 2028 年評選出候選場址時，台電公司將參照荷蘭、美國之策略，適時啟動集中式中期貯存設施計畫，詳細說明如下：

10.1. 國際經驗

截至 106 年 12 月底，國際間已有 23 個國家設置中期乾式貯存設施，包含美國、加拿大、德國等，目前正在使用中的乾式貯存設施共有 131 座，另有 5 座興建中或待啟用之乾貯設施，顯示乾式貯存已是國際間普遍採用及成熟的用過燃料貯存技術。

綜上所述，無論是用過核子燃料或是再處理殘餘廢棄物，在順利進行最終處置之前，應就放射性廢棄物之貯存妥善規劃，以期未來順利銜接至最終處置階段。而國際上使用核能發電的先進國家中，如荷蘭與瑞士，其放射性廢棄物管理策略係以集中式中期貯存，而後再進行最終處置，且均已興建足以貯存高中低放射性廢棄物之集中式貯存設施，並安全穩定營運中，其相關經驗與設計值得我國參考。

10.1.1. 荷蘭

荷蘭在1984年決定將放射性廢棄物(包括高放射性廢棄物及低放射性廢棄物)貯存至少100年，再進行以深層地質處置為其營運策略。荷蘭認為此種策略至少有下列6種正面效應：

- (1) 民眾對長期貯存之接受性高。一般民眾對於可由今日社會進行實質管制比利用分析模式來證明深地層處置沒有危險較有信心。
- (2) 有100年的期間可讓後端營運基金滋息達到廢棄物處置所需費用之規模。在100年期間，國際上或區域上對於放射性廢棄物可能找到共同的解決方法。
- (3) 未來藉由國際或區域合作將更有經濟效益，同時可得到更高的安全標準及更可靠的管制措施。
- (4) 在100年期間，部份會產生熱量的高放射性廢棄物將已冷卻至無需再冷卻之程度。
- (5) 在100年期間，有大量的低放射性廢棄物將衰減至輻射背景值以下之程度。
- (6) 在100年後，對於放射性廢棄物將有可能會出現突破性的處理技術或營運方法。

荷蘭放射性廢棄物之管理機構為COVRA，COVRA於1999年在Borssele地方興建HABOG高放射性廢棄物及用過核子燃料之集中式中期貯存設施。HABOG的設計壽命至少為100年，可用來貯存未來100年荷蘭用過核子燃料再處理所產生的高放射性廢棄物，以及試驗用反應器及研究實驗室所產生的用過核子燃料，並在貯存期間，進行深地層處置之財務、技術、及社會準備，以備在貯存期間完成後，可進行深地層處置。

(1) 放射性廢棄物分類

荷蘭放射性廢棄物分類方法參考IAEA分類方式，主要分為中低放射性與高放射性，再依廢棄物特性將國內放射性廢棄物分類分為5類。

- (a) 中低放射性廢棄物(LILW)：來源包含醫療廢棄物、工業放射性廢棄物及研究放射性廢棄物等。
- (b) 天然放射性物質衍生之中低放射性廢棄物(LILW-NORM)：為荷蘭特有放射性廢棄物分類，指在礦石處理過程自然衍生的中低放射性廢棄物。
- (c) 耗乏鈾中低放射性廢棄物(LILW-depU)：為鈾礦進行濃縮萃取過程中，衍生的放射性廢棄物，以氧化鈾(U_3O_8)的形式貯存，此類核能工業衍生之廢棄物因仍含有少量鈾元素，基於經濟考量暫時留存供未來濃縮鈾的生產，劃分為特有的一類。
- (d) 不會釋熱的高放射性廢棄物(HLW, non-heat-generating)：包含來自燃料束的護套廢棄物與尾料、核能研究與同位素生產過程產生之放射性廢棄物。
- (e) 會釋熱高放射性廢棄物(HLW, heat-generating)：包含用過核子燃料及其經再處理後的玻璃固化廢棄物。

(2) 貯存容器與收納方式

低中放射性廢棄物經廢棄物處理中心處理後，以200 L(約55加侖)鋼桶或1,000 L(約220加侖)的混凝土包件貯存；天然放射性物質衍生放射性廢棄物裝置於20英呎之特製金屬密封容器，其規格符合標準化的ISO容器；耗乏鈾廢棄物裝於標準化的3.5 m³的金屬製容器；會釋熱之高放射性廢棄物置於密封鋼筒，放於貯井中，不會釋熱之高放射性廢棄物則置於鋼桶中。

(3) 放射性廢棄物傳輸運送

COVRA集中式貯存設施具有完善的交通系統，其公路發達、鄰近港口且鐵路可直達場址內，因此放射性廢棄物傳輸十分便利。中低放射性廢棄物採用公路與鐵路並行之運輸方式，但仍以鐵路運輸為主；而用過核子燃料則在各電廠內貯存一段期間後再運送至國外進行再處理，Borssele核電廠的用過核子燃料以鐵路方式運送法國La Hague 進行再處理，Dodewaard 核電廠的用過核子燃料

則是海運方式送至英國 Sellafield 再處理。Dodewaard 核電廠的最後一批用過核子燃料再處理殘餘廢棄物是在 2010 年送至 COVRA 集中式貯存設施貯存。

(4) 高放射性廢棄物貯存設施(HABOG)

COVRA 集中式貯存設施中，HABOG 主要貯存高放射性廢棄物，考量到長期貯存的需求，採用了被動性安全設計，其設計準則考量了所有發生機率大於百萬年一次的意外事件，避免輻射外洩對環境造成危害。貯存區依照廢棄物是否釋放熱能分為兩區，會釋熱的高放射性廢棄物貯存區最大貯存設計容量為 250 m³，廢棄物主要來自研究用反應爐所產生之用過核子燃料或再處理玻璃固化廢棄物，以貯井形式存放；不會釋熱的高放射性廢棄物貯存區最大貯存設計容量為 2,000 m³，廢棄物主要來自燃料束的護套廢棄物與尾料，以遠端遙控的方式堆疊貯存。設施內設有自然通風設備。

10.1.2. 美國

美國歐巴馬政府於 2010 年決定停止內華達州(Nevada)的雅卡山(Yucca Mountain)高放射性廢棄物(用過核子燃料)最終處置計畫，該計畫是依據 1987 年「核子廢棄物政策法」(Amendment of Nuclear Waste Policy Act, NWPA)之修正案所規劃，該修正案指定內華達州的雅卡山為最終處置計畫之唯一候選場址，能源部依法進行場址特性調查、工程細部設計及安全評估分析等，但是雅卡山計畫不能順利運作，導致美國境內高放射性廢棄物無法適時進行處置。

美國能源部(DOE)於 2010 年成立「美國核能未來發展專案委員會(Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future)」(簡稱 BRC 委員會)，針對上述情勢進行研究評估並提出建議。BRC 委員會報告所建議的 8 項對策中，有關「集中式中期貯存設施」及「高放射性廢棄物(用過核子燃料)最終處置」之規劃情形如下：

(1) 2025 年完成集中式中期貯存設施

(2) 2048 年完成高放射性廢棄物地質處置設施。

BRC 委員會認為發展集中式中期貯存設施，使美國聯邦政府可以不受最終處置設施開始營運時間的影響，而能陸續將用過核子燃料從各核能電廠移放至集中式中期貯存設施。

DOE 在 2015 年 3 月 24 日提出新倡議，表示國防放射性廢棄物將進行獨立處置(與商業用過核子燃料分開)，同時將建造集中式貯存設施貯存商業用過核子燃料。DOE 發布用過核子燃料貯存與處置政策規劃後，Waste Control Specialists 公司(WCS)及 Holtec International 公司(Holtec)表達有意向開發民營集中貯存設施。

WCS公司原規劃於德州 Andrews郡建造一處集中式中期貯存設施，並於2015年向NRC提出申請，但2017年4月18日因財務問題，函請NRC暫停審查作業，2018年1月WCS公司與Orano CIS公司合資成立ISP公司，繼續推動集中式中期貯存設施建造執照申請案。2018年6月8日ISP公司函請NRC恢復審查作業，NRC於同年8月同意恢復先前WCS公司所提出的用過核子燃料集中式中期貯存設施建造執照申請案之審查作業。

Holtec公司規劃於新墨西哥洲Lea郡設立集中式貯存設施，於2017年3月向NRC提出申請，2018年2月28日NRC完成程序審查，正式立案將進行後續審查作業，NRC於2018年4月至5月間辦理多場公開討論會議向社會大眾說明審查過程並接受公眾評議。2018年9月，Holtec公司向NRC提送建造執照申請的補充文件第2部分。

10.1.3. 瑞士

根據瑞士核能法，自2006年7月起10年間禁止將用過核子燃料運輸至國外進行再處理，2016年7月，聯邦議會決定延長禁運期限至2020年6月，因此各電廠的用過核子燃料在燃料池經過數十年的冷卻後，將貯存於電廠內或電廠外之中期貯存設施。

瑞士的集中式貯存設施位於瑞士北部的維倫林根鎮(Würenlingen)，由ZWILAG公司負責該設施的興建與營運，ZWILAG

集中式貯存設施於1996年8月經瑞士聯邦政府核准後開始興建，採乾式貯存，2001年開始接收用過核子燃料與其它各類放射性廢棄物，廢棄物來源包含瑞士境內4座核能電廠的用過核子燃料、再處理殘餘廢棄物以及其它相關工業或研究產生的放射性廢棄物。

(1) 放射性廢棄物分類

瑞士的廢棄物分類方法係依照瑞士國內法規 Article 51 of the Swiss Nuclear Energy Ordinance (KEV, 2004)分類如下。

- (a) HAA：HAA 為德文 hochaktive Abfälle 的縮寫，意同高放射性廢棄物(high level waste)，包含用過核子燃料與再處理玻璃固化廢棄物。
- (b) ATA：ATA 為德文 alphanukleare Abfälle 的縮寫，意同 α 毒性廢棄物(Alpha-toxic waste)，非 HAA 類，且總 α 活度大於 20 kBq/g 的放射性固化廢棄物皆屬此類。
- (c) SMA：SMA 為德文 schwach- und mittelaktive Abfälle 的縮寫，意同中低放射性廢棄物(low and intermediate level waste)，非 HAA 及 ATA 的中低放射性固化廢棄物皆屬此類。
- (d) SMA ybc 與 ATA ybc：為尚未進行固化(yet to be conditioned, ybc)的中低放射性廢棄物與 α 毒性廢棄物的暫時性分類。

(2) 貯存容器與收納方式

高放射性廢棄物貯存區的用過核子燃料或再處理殘餘廢棄物貯存於金屬護箱，其本身兼具運輸與貯存功能，主要來自法國與德國，分別以 AREVATN 公司設計提供之 TN®24 系列以及德國 GNS 公司 (Gesellschaft für Nuklear-Service mbH, GNS) 設計提供的 CASTOR® 系列為主。因應相關安全法規與廢棄物處理技術的發展，金屬護箱的使用設計亦逐漸變化，近年較常使用的護箱型號包含 CASTOR® 28M，最大熱容量為 56 kW，滿載重荷重達 115 噸，可貯存 28 個再處理玻璃固化廢棄物。

(3) 放射性廢棄物傳輸運送

瑞士境內各核能電廠與回運之再處理殘餘廢棄物主要透過鐵路運輸，至ZWILAG集中式貯存設施附近再轉由公路運輸送至ZWILAG集中式貯存設施。在各個放射性貯存設施中均設有接收區，廢棄物經特製運輸卡車載入設施內後卸載，再進行後續的貯存或處理。高放射性廢棄物，如玻璃固化廢棄物與用過核子燃料，將以厚層的放射性廢棄物運輸專用容器進行運輸。

(4) 高放射性廢棄物貯存設施

高放射性廢棄物貯存設施的設計容量為200個護箱，專門貯存高放射性廢棄物(HAA)，來源包含用過核子燃料、再處理玻璃固化廢棄物，高放射性廢棄物所產生的衰變熱，透過設施設計的空氣自然對流進行被動冷卻。

10.2. 國內集中式中期貯存設施規劃

參考前述之國際經驗，我國用過核子燃料最終處置計畫執行過程中，如「候選場址評選與核定」階段(2018年~2028年)有所延遲，規劃於2029年啟動用過核子燃料集中式中期貯存設施計畫，2038年確定場址並完成環境影響評估，2044年前完成興建啟用(如圖10-1)。此計畫分成9個主要執行階段來規劃，包括：場址評選(含場址調查)、投資可行性評估與政府核准、環境影響評估並確定場址、中期貯存設施發包(含規範準備、發包、審標與決標)、中期貯存設施細部設計與建造執照申請文件準備、建造執照申請(含安全分析報告審查)、設備製造與貯存場施工(含相關附屬設施施工)、試運轉與運轉執照申請(含試運轉測試)、及運貯階段。各階段所需作業期間分述如下：

- (1) 場址評選(含場址調查)：4年
- (2) 投資可行性評估與政府核准：2年
- (3) 環境影響評估並確定場址：3年
- (4) 中期貯存設施發包(含規範準備、發包、審標與決標)：1.5年
- (5) 中期貯存設施細部設計與建造執照申請文件準備：1年
- (6) 建造執照申請(含安全分析報告審查)：1年

- (7) 設備製造與貯存設施施工(含相關附屬設施施工)：2 年
- (8) 試運轉與運轉執照申請(含試運轉測試)：1 年
- (9) 運貯階段：第 15 年開始運轉

用過核子燃料長程處置計畫應變方案

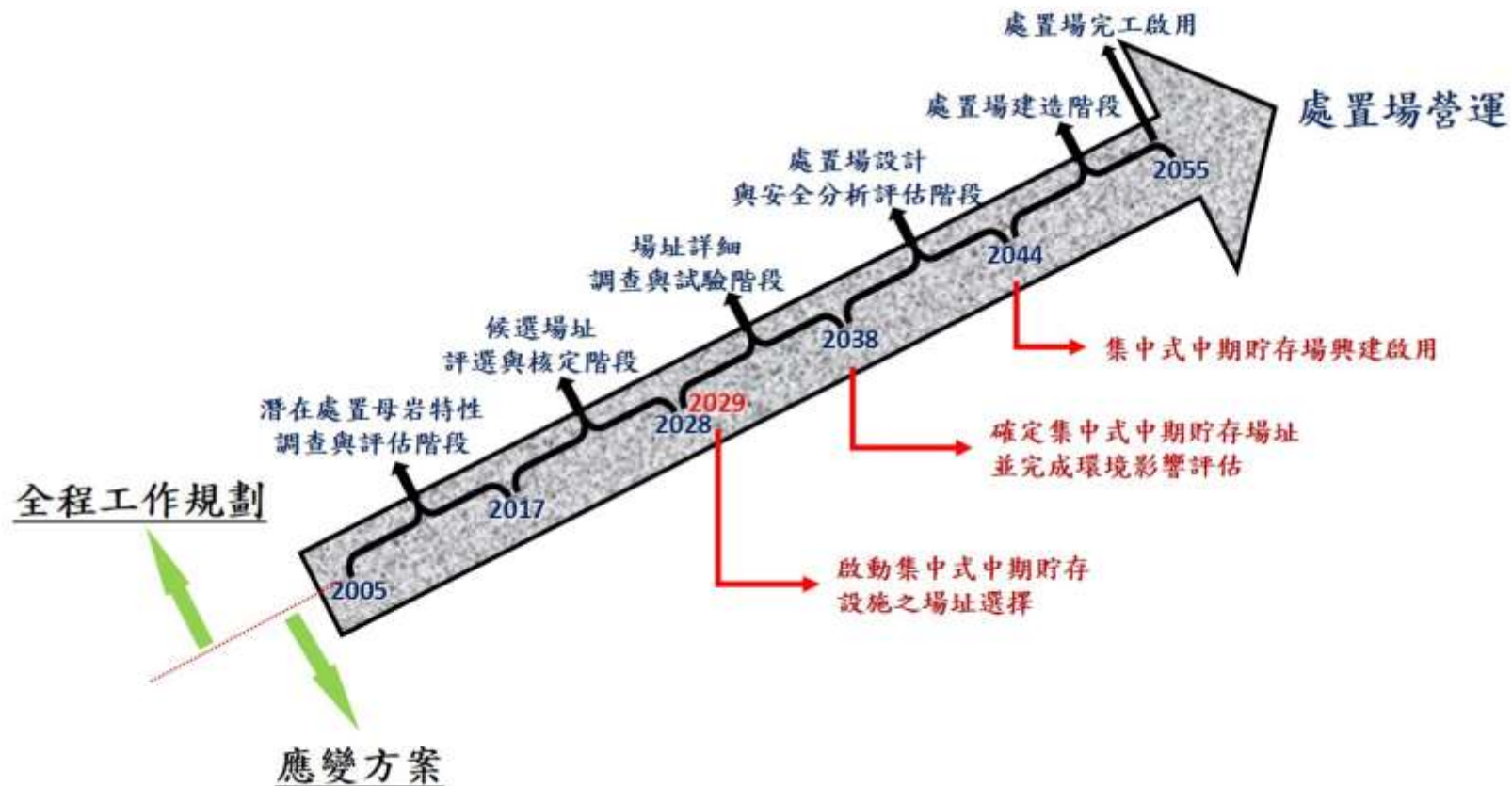


圖 10-1：用過核子燃料最終處置計畫替代因應方案

10.3. 結語

國內於 1986 年開始進行用過核燃料最終處置技術發展及地質調查計畫，就已獲得之資料研判，由 SNFD2009 報告初步評估結果顯示，臺灣確實存在潛在處置母岩，已進行潛在母岩特性調查與評估作業，並建立深層地質調查分析及安全處置功能評估之初步技術與人力，以及彙整過去研發成果於 2009 提報 SNFD2009 報告送原能會審查，並經原能會於 2010 年准予核備，達成潛在處置母岩特性調查與評估階段的第一項目標。

台電公司依法將持續推展用過核子燃料最終處置計畫，已於 2017 年底提報 SNFD2017 報告送主管機關審查，並預定於 2038 年選定用過核子燃料最終處置設施場址，2055 年完工啟用，與大部分核能發電國家規劃於 2040 年至 2065 年間啟用其處置設施相當。

在推動境內處置計畫過程中，如於用過核子燃料最終處置計畫第 2 階段「候選場址評選與核定」階段結束時(2028 年)，若無法依時程順利提出候選場址，將規劃於 2029 年啟動「集中式中期貯存設施」之場址選擇，2038 年確定場址並完成環境影響評估，2044 年前完成興建啟用。惟無論是否進行集中式中期貯存設施方案，最終處置設施選址作業仍須依法持續進行。