

# 出國報告（出國類別：考察）

## 赴瑞典、芬蘭考察 放射性廢棄物營運設施

服務機關：經濟部核廢料處理專案辦公室

台灣電力公司

台灣電力公司核能後端營運處

姓名職稱：劉文光管理師

蔡富豐 專業總工程師

黃秉修組長

張仁坤課長

派赴國家：瑞典、芬蘭

出國期間：103年5月19日～103年5月30日

報告日期：103年7月18日



## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：第三屆兩岸放射性廢物管理研討會

頁數： 29 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/張仁坤/02-23657210#2232

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

劉文光/經濟部/核廢料處理專案辦公室/管理師/ (02)2366-6344

蔡富豐/台電公司/總經理副總經理辦公室/專業總工程師/(02)2366-6564

黃秉修/台電公司/核能後端營運處/組長/02-23657210#2230

張仁坤/台電公司/核能後端營運處/課長/02-23657210#2308

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：103.05.19~103.05.30

出國地區：芬蘭、瑞典

報告日期：103 年 07 月 18 日

分類號/目：

關鍵詞：放射性廢棄物、最終處置計畫、地下實驗室

內容摘要：

馬總統於 102 年 10 月 24 日接見瑞典核子燃料及廢棄物營運公司(SKB)、芬蘭放射性廢棄物專責公司(Posiva)二位專家，並指示相關單位派員赴上述二國考察放射性廢棄物營運設施，了解其發展過程，以及取二國推動後端營運計畫所之累積經驗，提升國內後端營運計畫規劃的週延性並增進效益。本公司依馬總統指示邀集相關單位，於 103 年 5 月 19 日至 5 月 30 日考察瑞典及芬蘭放射性廢棄物營運設施。

本次考察行程為拜會芬蘭輻射及核能安全局(STUK)、芬蘭放射性廢棄物專責公司(Posiva)，考察芬蘭 ONKALO 地下實驗室(ONKALO-URL)及位於 Olkiluto 電廠之 VLJ 中低放射性廢棄物處置場；拜會瑞典核子燃料及廢棄物營運公司(SKB)、考察瑞典 CLAB 用過核子燃料濕式中期貯存設施、SKB 公司之廢棄物罐

實驗室(Canister Laboratory)、位於 Äspö 島的地下實驗室(Äspö Hard Rock Laboratory, Äspö-HRL)等。

經本次考察活動及與相關單位的交流討論，了解瑞典與芬蘭二國都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完善的系統並有具體的進度，目前二國都已興建用過核子燃料深層地質處置的地下實驗室，以進行相關技術驗證工作，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，其二國在核能發電後端營運管理之體制、經驗與成就值為我國借鏡參考學習。

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

## 目 次

目 次.....	i
壹、目的 .....	1
貳、過程 .....	2
參、工作內容 .....	3
肆、心得及建議 .....	28

## 壹、目的

馬總統於 102 年 10 月 24 日接見瑞典核子燃料及廢棄物營運公司(Nuclear Fuel and Waste Management Co., SKB)、芬蘭放射性廢棄物專責公司(Posiva)二位專家，並指示相關單位派員赴上述二國考察放射性廢棄物營運設施，了解其發展過程，以汲取二國推動後端營運計畫所之累積經驗，提升國內後端營運計畫規劃的週延性並增進效益。本公司依馬總統指示邀集相關單位，於 103 年 5 月 19 日至 5 月 30 日考察瑞典及芬蘭放射性廢棄物營運設施。

本次考察行程為拜會芬蘭輻射及核能安全局(STUK)、芬蘭放射性廢棄物專責公司(Posiva)，考察芬蘭 ONKALO 地下實驗室(ONKALO-URL)及位於 Olkiluto 電廠之 VLJ 中低放射性廢棄物最終處置場；拜會瑞典核子燃料及廢棄物營運公司(SKB)、考察瑞典 CLAB 用過核子燃料濕式中期貯存設施、SKB 公司之廢棄物罐實驗室(Canister Laboratory)、位於 Äspö 島的地下實驗室(Äspö Hard Rock Laboratory, Äspö-HRL)等。

經本次考察活動及與相關單位的交流討論，了解瑞典與芬蘭二國都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完善的系統並有具體的進度，目前二國都已興建用過核子燃料深層地質處置的地下實驗室，以進行相關技術驗證工作，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，其二國在核能發電後端營運管理之體制、經驗與成就值為我國借鏡參考學習。

## 貳、過程

自 103 年 5 月 19 日出發，迄 5 月 30 日返國（共計 12 天），停留芬蘭赫爾辛基、勞馬及瑞典斯德哥爾摩、奧斯卡港四地。詳細訪問行程如下：

日期	地點與行程	工作內容
5 月 19 日（一）	台北到赫爾辛基	轉機
5 月 20 日（二）	台北到赫爾辛基	去程
5 月 21 日（三）	赫爾辛基	拜會 STUK
5 月 22 日（四）	勞馬	拜會 Posiva 公司、考察 Olkiluoto 的 ONKALO-URL、VLJ 中低放射性廢棄物最終處置場
5 月 23 日（五）	斯德哥爾摩	轉機
5 月 24 日（六）	斯德哥爾摩	週末整理資料
5 月 25 日（日）	奧斯卡港	去程
5 月 26 日（一）	奧斯卡港	考察 CLAB、拜會 SKB 公司
5 月 27 日（二）	斯德哥爾摩	考察 Canister Lab 及 Äspö-HRL
5 月 28 日（三）	斯德哥爾摩	拜會 SKB 總部
5 月 29 日（四）	斯德哥爾摩到台北	返程轉機
5 月 30 日（五）	斯德哥爾摩到台北	台北

## 參、工作內容

### 一、芬蘭及瑞典放射性廢棄物、組織與背景相關法規簡介

#### (一)芬蘭

芬蘭目前運轉中之核能機組共有 4 部，總裝置容量為 2,696 MWe，其中 2 部為沸水式(BWR)，2 部為俄製壓水式(WER)，核能所提供之電力約佔芬蘭全國所需電力之 26%。Posiva 公司是芬蘭最終處置的專責機構，由兩家電力公司 TVO 及 Fortum 於 1995 年合組。其中 TVO 佔 60%股份，Fortum 佔 40%股份。股份的分配約相當於兩家電力公司所擁有的核能電廠及其退出的用過核子燃料之數量比。TVO 及 Fortum 彼此有訂定如何經營 Posiva 公司之協議書，輻射及核能安全局 (Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK) 為芬蘭的輻射安全及核子安全之管制機構，同時亦從事研究工作，特別著重於環境輻射之監測及輻射對人類影響之研究。芬蘭核能後端營運的主要組織架構如圖 1 所示。

芬蘭的放射性廢棄物管理政策於 1983 年訂定，隨後貿易與工業部(Ministry of Trade and Industry, MTI)亦提出相關政策，即設定廢棄物管理準備工作的目標及時程。跟用過核子燃料安全性相關的法案為：1.於 1991 年制定的核能電廠安全通則(General regulations for the safety of nuclear power plants)明訂與用過核子燃料貯存相關的規定；及 2.於 1999 年制定的用過核子燃料安全通則(General regulations for the safety of spent fuel disposal)。對於一般安全的詳細法規，則由 STUK 根據上述兩法案來訂定，包括：1.於 2001 年訂定的用過核子燃料長期安全規範(Long-term safety of disposal of spent nuclear fuel, YVL 8.4)，及 2. 於 2002 年訂定的用過核子燃料處置設施安全操作規範(Operational safety of a disposal facility for spent nuclear fuel, YVL 8.5)。

依據 1987 年核能法(Nuclear Energy Act)，政府可以核准核能設施之設置，但在第一個核准階段-決策原則階段(Decision in Principle, DiP)，國會(Parliament)有權否決政府建造重要核能設施(例如核電廠與處置場)的決定，預定設施位置取得地方政府同意也是 DiP 的必要條件。此外亦須由 STUK 對該設施之安全提出正面的陳述意見。依法核能電廠對高放射性廢棄物管理有財務與運轉的責任，因此由兩家電力公司(TVO 公司及 Fortum 公司)於 1995 年聯合資助成立放射性廢棄物專責機構 Posiva 公司，負責用過核子燃料之研發、規劃與處置工作之推動。

MTI 負責監督電力公司/放射性廢棄物處置專責機構，對放射性廢棄物管理的推動與研發工作是否符合國家政策，並確保其財務基金能滿足處置工作所需。STUK 則負責核能安全管制，並對執照申請的技術與安全相關重要文件進行審查。MTI 與 STUK 分別有核能諮詢委員會(Advisory Committee on Nuclear Energy)與核安諮詢委員會(Advisory Committee on Nuclear Safety)提供建言。為確保未來高放射性廢棄物管理及處置所需的經費，MTI 每年會決定金額，由電力公司提撥經費至國家高放射性廢棄物管理基金(State Nuclear Waste Management Fund)。

在放射性廢棄物專責公司提出 DiP 申請時，政府必須考慮建造計畫是否與社會的整體利益一致，特別須注意設施的需求性、可能場址的適宜性及其對環境之影響。而 STUK 須進行初步安全評估，可能場址所在地之政府當局亦須提出接受或拒絕選址結果的說明，而最後的決策，亦須獲得國會同意。

## (二)瑞典

瑞典有 4 座核能電廠總共 10 部核能機組在運轉中，總裝置容量為 9,399 MWe，其中 7 部為 BWR，3 部為 PWR。在 2010 年，核能發電約佔該國總發電量之 45%。瑞典國會於 1977 年通過「放射性廢棄物法(Waste Act)」，要求各電力公司就核能發電所產生之放射性廢棄物的處理、貯存與最終處置進行整體規劃並據以執行。有鑑於此，瑞典 Forsmaks Kraftgrupp、OKG、Vattenfall 及 Barseback Kraft 等 4 家電力公司於 1978 年合資成立 SKB 公司，以專責推動執行瑞典核能發電所產生低放射性廢棄物及用過核子燃料處理、貯存與最終處置等計畫，各電力公司擁有 SKB 之股權分別為 Vattenfal-36%；Forsmarks Kraftgrupp-30%；OKG-22%；Barseback Kraft-12%。瑞典的核能後端營運管制機構：瑞典核能檢查署 (Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI) 負責核子安全管制；瑞典輻射防護院 (Swedish Radiation Protection Institute, SSI) 負責輻射安全管制。2007 年 4 月瑞典政府宣佈將此二機構合併成單一機構，稱為瑞典輻射安全機關 (Swedish Radiation Safety Authority, SSM)。此機關受瑞典環境部管轄，負責瑞典的核子安全、輻射防護及核子非擴散等領域。SSM 包含 4 個部門：核能電廠安全、放射性物質、輻射防護及國際事務。SKB 的所有作業受 SSM 監督，SKB 亦負責核子廢棄物營運之必要研究發展工作，每年並為各電力公司進行核子廢棄物營運之成本估算，作為 SSM 審查每一度核能發電售電攤提費用之依據。瑞典核能後端營運的主要組織架構，如圖 2 所示。

瑞典制訂放射性廢棄物相關法規如下：

1. 輻射防護法(Radiation Protection Act, 1988:220)

為放射性廢棄物管理與處置作業之輻射防護標準，輻射防護研究所負責輻射法規之制定，及SKB所提送報告中輻射相關事宜的審查。

2. 核能作業法(Act on Nuclear Activities, 1984:3; 1992:1536)

依據1984年發布的執照申請程序之主管機關為瑞典核能檢查署SKI(目前為SSM)，負責後端營運之管制，主要責任包括：

- (1) 發布法規與指引。
- (2) 審查及監督廢棄物管理與處置的安全。
- (3) 審查SKB提報的研發計畫(每3年提報1次)。
- (4) 審查SKB對廢棄物管理與除役費用的估算。
- (5) 對進行可行性評估中之市鎮提供諮詢服務。

核能作業法中規定核能業者需負起技術與財務上的義務，進行放射性廢棄物之安全管理與處置，且每3年須提出合理的放射性廢棄物處置研發計畫。SKB公司於1998年9月提報R&D計畫給SKI 審查，該報告於2000年1月稍作補充後通過政府審查。

3. 用過子燃料與放射性廢棄物未來費用財務法(Act on Financing of Future Costs for Spent Fuel and Nuclear Waste, 1981:669) 規定核電廠每年提撥放射性廢棄物管理所需費用，並預估未來經費需求，由瑞典SKI審查後(目前為SSM)，由政府決定金額。

## 二、拜會芬蘭輻射及核能安全局 (Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK)

本次拜會由 STUK 的主管官員 Risto Paltemaa 及 Jussi Heinonen 2 位先生負責接待，Posiva 公司資深顧問 Timo Äikäs 亦隨同與會進行討論(圖 3)，Risto 先生簡介了芬蘭放射性廢棄物管理的制度，以及 STUK 於低放射性廢棄物與用過核子燃料最終處置設施興建過程中扮演的角色。我方並由原能會物管局陳文泉組長進行「台灣的放射性廢棄物管理」簡報，雙方就放射性廢棄物管理的議題充分交換意見與資訊。與會中，我方與會人員亦對 STUK 與 Posiva 公司雙方如何共同完成用過核子燃料最終處置設施選址成功的過程提出詢問，STUK 回復選址過程中該機關以管制機關角色，對於用過核燃料處置的安全負責把關，因此會就各項安

全相關議題要求 Posiva 公司，亦同時將相關資訊充分提供給大眾，並回應社會大眾的疑問。

STUK 人員說明其現階段最主要的工作即為進行位於 Olkiluoto 電廠之用過核子燃料最終處置場建造執照的審查工作，並監督處置場建造，STUK 預定於 2020-2022 年審查運轉執照。

STUK 對於放射性廢棄物設施執照的審查，採取「建造執照」與「運轉執照」兩階段審查，此方式與我國目前放射性廢棄物設施審查程序相似。但芬蘭在決定最終處置場址之前，於 DiP 階段時國會有權否決政府關於興建最終處置場之決定，並 DiP 要求取得預定設施位置所在地方政府同意為申請之先決條件，而處置場址的確認並不須經過公投程序，芬蘭用過核子燃料最終處置場 DiP 過程如圖 4 所示。

另 STUK 人員表示，芬蘭的用過核子燃料最終處置計畫之得以順利展開，並選定最終處置場址，並已進入建照申請程序，歸功於下列因素：

- 1.穩定的國家放射性廢棄物管理政策及相關法律規章的隨時更新；
- 2.明確地定義廢棄物產生者、管制單位及政府的責任與義務；
- 3.預先收集的管理基金；
- 4.管制法規與處置計畫平行發展；
- 5.階段性的公開透明且可論證的執行計畫；
- 6.執行單位與管制單位可就技術議題對話；
- 7.長期性公開透明的民眾溝通及成功提升地區性的接受度。

芬蘭核能安全局(STUK)的組織架構如圖 5 所示，於 2011 年時總共有 344 位職員。

### 三、拜會 Posiva 公司

拜訪 Posiva 公司在 Vuojoki Manor 之辦公處所，此辦公處所位於核電廠與用過核子燃料最終處置的預定場址附近，該辦公處所為 17 世紀興建之莊園，Posiva 公司租下該莊園，莊園之建築物部份樓層做為辦公室，其他樓層則租給業者做為對外營業之餐廳，亦開放該宅邸的部分空間供民眾參觀、辦展覽與舉行會議，以此做為公司敦親睦鄰之用，以融入當地民眾。

本次拜訪芬蘭放射性廢棄物專責公司 Posiva，由該公司顧問 Timo Äikäs 及副

總裁 Erkki Palonen 先生負責接待，並進行「Posiva and Finnish Radioactive Waste Management Program」簡報(圖 6)，Timo 先生首先介紹 Posiva 公司，其公司組織架構如圖 7 所示，芬蘭放射性廢棄物的歷程提出說明，自 1990 年代起，芬蘭即有中低放射性廢棄物的最終處置場，位於兩處核電廠區內。至於用過核子燃料最終處置場址，自 1978 年開始進行處置場址的調查，經過場址初步調查、細部場址調查，到 1999 年~2001 年正式進入法定程序 (Decision in Principle, DiP) 提出以 Olkiluoto 為放射性廢棄物最終處置場址，並獲得地方及中央政府與議會同意。接著，興建 ONKALO-URL 做為展示及各項安全性實驗之用，目前已深入地下 437 公尺，最終用過核子燃料的處置地約為地下 500 公尺左右，目前正在申請最終處置設施的建造，預計 2022 年開始營運，芬蘭放射性廢棄物計畫與重要里程如表 1 所示。

另，Timo 先生分享芬蘭在放射性廢棄物管理的成功經驗，有幾點如下：

1. 明確的權責與組織架構：指的是清楚劃分政府各單位的權責與核廢棄物產生者的管理組織，相關單位權責如下：
  - (1) 勞動及經濟部(MEE)：負責制定芬蘭的能源政策，核子廢棄物營運原則，以及核發核子物料之輸出入許可，MEE 也提供核子安全及核子廢棄物營運有關的研發工作之財務支援。
  - (2) 芬蘭輻射及核能安全局(STUK):為芬蘭的輻射安全及核子安全之管制機構，負責核能安全管制工作，並負責執照申請的審查。
  - (3) Posiva 公司：為芬蘭兩家電力公司於 1995 年合資成立的機構，專門負責用過核子燃料的處置計畫。
2. 明確的決策原則
  - (1) 政府於 1983 年制定放射性廢棄物營運之政策，此政策明訂放射性廢棄物營運之研究、規劃及執行之原則、目標及時程。
  - (2) 決策原則階段(Decision in Principle, DiP)
3. 處置計畫具有彈性的微調策略(“do and see” strategy)與全程規劃
  - (1) 芬蘭並不採取「等著看 (wait and see)」策略，而是邊做邊觀察，芬蘭自 35 年前啟用核能發電之後，對於用過核子燃料的處理原則，首先考慮全數運往國外永久處置，但沒辦法做到，而考慮再處理，但還不行，就決定在芬蘭境內找一地層進行深層處置，而芬蘭在 1994 年

決定用過核子燃料要在自己國家處理的政策後，隔年專責處理機構 Posiva 公司成立。

- (2) 處置計畫具全程目標，但於過程保留決策的彈性以期妥善進行計畫的推動。
- (3) 穩定的執行處置計畫，包括發展處置技術、處置概念的發展及選址計畫。

#### 4. 成功的技術研究發展計畫

- (1) 於 Olkiluoto 電廠之 ONKALO-URL 進行工程開挖及技術驗證，此也是做為公眾溝通的方式之一。
- (2) 處置概念 KBS-3 多重障壁長期實際之技術驗證。
- (3) 長期處置工程技術之發展及驗證。

#### 5. 國際互動與合作

Posiva 公司與下列國外機構建立有彼此交換資訊之夥伴關係：

- (1) SKB,瑞典
- (2) ANDRA,法國
- (3) NAGRA,瑞士
- (4) OPG,加拿大
- (5) RAWRA,捷克
- (6) NUMO 日本
- (7) RWMC 日本

此外 Posiva 與 SKB 及 ANDRA 在處置設施系統及岩床調查簽訂有定期合作之合約。

#### 6. 溝通與承諾

溝通包括政府對承諾的信守、清楚的界定廢棄物生產者、管制者、及中央政府相關部會的權責。潛在社區的接受度扮演關鍵角色，而觀念的改變需要用上數十年的時間，所以需要持續不懈的溝通；對用過核子燃料的經營者要有建立民眾之信心，才能促成公眾接受。

Posiva 公司曾利用下列方法以進行民眾溝通：

- (1)將環境影響評估有關之資料分送到候選區域之每一家庭，同時在 Posiva 公司辦公室提供相關之說明文件。

(2)舉行小型之民眾會議。

(3)舉行展示會以說明場址調查作業及環境影響評估之結果，包括提供機會給民眾提出意見。

(4)利用新聞與民眾對談

STUK 亦藉由訪談、會議、及宣傳手冊與居民及地方代表展開長期之溝通。

最後經由 Olkiluoto 所在地的 Eurajoki 地方議會以多數同意 Olkiluoto 為芬蘭用過核子燃料最終處置場之場址

## 7. 健全財務

需即早建立基金以備處置場址興建與運作所需，芬蘭核子廢棄物營運之財務原則是廢棄物產生者應負擔所有的成本，TVO 及 Fortum 兩家電力公司每年應向 MEE 提報廢棄物營運計畫及成本估計，而未來的核子廢棄物營運之財務準備乃是透過 1988 年依據核能法成立的芬蘭國家核子廢棄物營運基金（Finnish State Nuclear Waste Management Fund）執行，該基金是由 TVO 及 Fortum 每年撥款。

Posiva 公司人員強調長期民眾溝通與處置技術發展相當重要，而芬蘭成功的引入瑞典 SKB 公司的 KBS-3 處置概念，並與瑞典及其他國家深度合作，並藉由 ONKALO-URL 進行技術發展驗證並作為民眾溝通的最佳平台，並以長期、靈活之方式與民眾溝通，建立民眾的信賴及信心。

## 四、考察芬蘭 ONKALO 地下實驗室及位於 Olkiluoto 電廠之 VLJ 中低放射性廢棄物處置場

### (一)考察芬蘭 ONKALO-URL

本次參訪 ONKALO-URL 由地質師擔任解說人員，在進入 ONKALO-URL 前，先觀賞工安教育影片，方能搭車由運輸隧道達地下420公尺的實驗坑室。ONKALO-URL 當日下午僅接受3批次訪客，每批次僅有7名訪客參訪。

如前述ONKALO-URL是芬蘭推動處置計畫技術發展驗證，及民眾溝通的最佳平台。芬蘭國會於2001年5月以159票贊成對3票反對的壓倒性投票結果，授

權政府開始在Eurajoki進行深層地質最終處置場的建造研究與後續的相關工作。ONKALO-URL為芬蘭規劃在Eurajoki所預定建造的深地層先導設施(

圖 8)，於2003年完成規劃、設計與研究主題等相關的審查；Posiva 公司先於ONKALO-URL進行花崗岩地下實驗室之施工(2004-2009年)，於2010年開挖至處置深度，2011開挖作業完成，總開挖土方量340,000 立方公尺，並於處置深度於437公尺進行技術試驗與探查工作。最終處置場預計在2015年進入處置場興建階段，並於2020年之後申請處置場運轉執照。此外，芬蘭Posiva 公司亦將ONKALO-URL規劃為具有下述的特殊功能：

1. 建立 POSIVA 在調查、規劃、建造及運轉深地層設施的實際經驗，以確保將來實際場址的各項運作能順利進行。
2. 作為將來 Eurajoki 高放射性廢棄物深層地質處置場的先導試驗坑道，以期能由 ONKALO-URL 的實際執行成果中，獲得直接的地質條件資訊，提供深層地質處置場之最詳實的設計資訊。
3. ONKALO-URL 在 STUK 監督下，若地質條件許可，可作為未來深層地質處置場的一部份。

經由解說人員解釋ONKALO-URL岩體雖然完整，但仍不免會有裂隙或不連續面，因此處置孔的選擇，會經由各種地質調查的方式避開裂隙或不連續面(如圖 9)，以確保安全。

##### 五、考察位於 Olkiluto 電廠之 VLJ 中低放射性廢棄物處置場

在Posiva公司Timo先生與Olkiluto電廠現場公關人員帶團員進入參觀並解說VLJ中低放射性廢棄物處置場，芬蘭Olkiluoto及Loviisa兩核能電廠均興建有稱為VLJ之中低放射性廢棄物最終處置場。Olkiluoto核能電廠興建有兩個筒倉（silo），一個是用來處置低放射性廢棄物(活度低於1MBq/kg)，另一個是用來處置中放射性廢棄物(所含的活度介於1MGq/kg至10GBq/kg之間)，其處置場開挖至地下100公尺處之結晶岩盤，並沒有設計成可再取出。環繞Olkiluoto處置場之岩石為片麻岩似的石英閃長岩（gneissic tonalite）。低放射性廢棄物筒倉為單純的岩筒倉，而中放射性廢棄物筒倉則在岩筒倉內又加上一厚牆的混凝土筒倉。所有中放射性廢棄物是採用瀝青固化，並裝在混凝土箱

內，每一混凝土箱可盛裝16桶廢棄物。運轉廢棄物是以特殊車輛沿著運輸隧道運至筒倉處置。當最終處置場停止運轉後，隧道及豎井（shaft）均將封閉，而不再對處置場進行監測。

Olkiluoto之VLJ處置場於1987年11月開始興建，1991年5月完工，總開挖土方量90,000 立方公尺，而於1992年5月開始運轉，預訂於2060年關閉。Olkiluoto可處置該廠40年運轉期間所產生的運轉廢棄物，中放射性廢棄物筒倉之容量為17,360桶，而低放射性廢棄物筒倉之容量則為24,800桶，也就是約可貯存8,400立方公尺之運轉廢棄物。處置場是由Olkiluoto電廠人員負責運轉。Olkiluoto之示意圖及廢棄物桶之堆置情形如圖 10所示。

六、考察瑞典 CLAB 用過核子燃料濕式中期貯存設施、SKB 公司之廢棄物罐實驗室(Canister Laboratory)、位於 Äspö 島的地下實驗室(Äspö Hard Rock Laboratory, Äspö-HRL)

#### (一) 考察瑞典 CLAB 用過核子燃料濕式中期貯存設施

考察CLAB設施由SKB international 的總裁Magnus先生負責接待，瑞典的用過核子燃料貯存因原先策略為再處理，每一部核能機組均只有一個很小的用過核子燃料池。為方便再處理進行，用過核子燃料池通常只要在用過核子燃料池中貯存9個月後，即裝入運輸護箱，再以專用運輸船M/S Sigyn (圖 11)運至全國唯一的用過核子燃料濕式中期貯存設施CLAB貯存，此暫存的時間約為30~40年，待位於Osthammar市的Forsmark用過核子燃料最終處置場營運之後，再將封裝過的用過核子燃料以專用運輸船運送至該地處置。瑞典後來改採用過核子燃料直接處置。

CLAB位於瑞典的Simpevarp半島上之Oskarshamn核能電廠之廠區。CLAB於1980年開始興建，1985年開始運轉，目前約有SKB員工130人，其中一半負責每日之運轉工作，另一半則負責輻射防護，化學取樣，維護及修理工作。

CLAB之佈置如圖 12所示，包含兩部份：1.地上建築物—用來將用過核子燃料從運輸護箱卸下，2.地下建築物—即所謂的岩穴（rock cavern），用來貯存用過核子燃料。最初岩穴共包含4個貯存池及1個備用池，總容量為5,000噸，CLAB後來又建造另一個岩穴以增加貯存容量，於2008年開始運轉，擴充後之

貯存容量可達8,000噸，每年接收量為200噸，因此該貯存容量可以維持40年的營運，若有需要，亦可擴充貯存容量。CLAB之所有者及執照持有者為SKB，其總建造費約1,700百萬瑞典幣，每年之運轉及維護費約100百萬瑞典幣。

CLAB之操作方式為從卸載池將用過核子燃料自運輸護箱移出後，用過核子燃料元件將被移至貯存罐以進行後續之搬運及貯存。充滿水的升降籠將把貯存罐下降至貯存區，然後貯存在貯存池內預先設定之位置。用過核子燃料元件之卸載及隨後之挪移作業是在水下利用水力機械來進行，貯存池約在地下40公尺處，用過核子燃料置於8公尺的水面下。

瑞典是利用特殊設計之運輸船M/S Sigyn將各核能電廠之用過核子燃料運至CLAB進行中期貯存。M/S Sigyn之載重為1,400噸，護箱將利用碼頭卡車送到船上，當到達CLAB之港口時則再利用碼頭卡車將護箱運出。運輸所用之金屬護箱共有10個，每個可裝載17束BWR燃料元件或7束PWR燃料元件。未來用過核子燃料在CLAB之封裝廠完成封裝後，亦將利用此種方式運抵Forsmark進行最終處置，因此瑞典實質上已經建立完整的如圖 13所示之放射性廢棄物營運體系。

此外，SKB亦利用M/S Sigyn運輸船舉行展覽及討論會以進行公眾溝通，1996~2000年歷年參加人數如下：

1. 2,300 人,1996 年；
2. 6,000 人,1997 年；
3. 4,500 人,1999 年；
4. 7,000 人,2000 年。

## (二)考察 SKB 公司之廢棄物罐實驗室(Canister Laboratory)

本次參訪 SKB 廢棄物罐實驗室(Canister Laboratory)係由 Stefan Bergli 先生負責接待，詳細說明廢棄物罐實驗室的研究發展項目，廢棄物罐實驗室位於 Oskarshamn 港口邊，其入口處擺放打撈的銅製古砲(圖 14)，利用天然類比的方式展示銅容器的長期安全性，更增加銅容器的長期安全性的證據，並備有簡易的展示室，除了展示縮小比例的銅製廢棄物罐，亦展示放射性廢棄物最終處置場構造的小比例尺模型，以及未來最終處置時包覆在廢棄物罐外的膨潤土(bentonite)讓參訪人員印象深刻。

在深層地質處置中，廢棄物罐的設計良窳會直接影響到放射性核種的釋出時間，對於處置場的安全性關係密切。廢棄物罐的主要功能為將用過核子燃料及所

含之放射性物質包封住，使其在一定設計年限內不釋出至其外空間。故選擇廢棄物罐材料時，需考慮其抗腐性、抗壓性、抗熱性、抗放射性及製作性。瑞典 KBS-3 處置概念(圖 15)中，廢棄物罐為銅質外殼鑄鐵為內裡(SKB, 1999)之設計，目前設計以銅製外殼(50mm)及內層不銹鋼(50mm)所製成，該實驗室於 1998 開始營運已經發展出製造、封裝、偵測與測試銅製廢棄物罐的技術等。

另由於銅罐頂蓋的技術關係廢棄物罐的成敗，SKB 針對廢棄物罐的銲接技術，平行發展電子束銲接技術(Electron Beam Welding, EBW)及摩擦攪拌銲接技術(Friction Stir Welding, FSW)。經 SKB 驗證摩擦攪拌銲接技術可以獲得高品質的廢棄物罐銲接成果，因此將採用摩擦攪拌銲接技術來銲接廢棄物罐(圖 16)。在銲接品質檢測方面，SKB 已發展超音波檢測及放射照射檢測兩種非破壞檢測方式，未來該實驗室將轉作為廢棄物罐製造的人才訓練基地。

### (三)考察位於 Äspö 島的地下實驗室(Äspö Hard Rock Laboratory, Äspö-HRL)

瑞典自 1986 年開始在東部濱海 Äspö 島南端推動一個供現場試驗的地下實驗室(Äspö-HRL)，進行地球科學技術、場址調查程序、處置場建造與包封材料等技術的現地試驗。該地下實驗室設計 3600 公尺長，以螺旋狀深入地下 450 公尺深處，鑽取 13 個 175 公分直徑的垂直處置坑，因而發展了新的垂直鑽孔技術，也修改了傳統的 TBM 機具的設計；在地下實驗室中坑道的內部填充 30%的膨潤土及 70%的碎石，進行處置概念的緩衝回填材料試驗；處置坑中置放銅罐及膨潤土，以模擬水力－化學－力學－熱效應的交互關係；該地下實驗室設計了含 6 個廢棄物罐地質處置坑的原型處置場(prototype repository)，以發展合適的工程標準、品質要求標準及品質系統。

本次參訪 Äspö-HRL，係由地下實驗室公關人員接待。先由公關人員簡報介紹 Äspö-HRL 概況及進行工安說明，隨後搭乘人員運輸電梯直接抵達地下實驗室地下 420 公尺處的運輸坑道處。由於 Äspö-HRL 對國外研究單位採開放態度，因此有很多國外專責機構也在 Äspö-HRL 的試驗坑道進行研究試驗，同時可見到未來將會使用於最終處置場安置廢棄罐的特殊車輛，瑞典不僅透過地下實驗室的技術發展驗證(圖 17)，以階段性縝密地發展各項處置技術，而並該實驗室每年約有 1 萬人造訪作為民眾溝通的最佳平台，讓所有瑞典民眾瞭解政府有能力從事放射性廢棄物處置，以解除人民對放射性廢棄物處置場的疑慮。

另外 SKB 亦在 Äspö-HRL 地面層，亦設置膨潤土實驗室 (bentonite laboratory)，公關課人員亦帶領大家參訪，該實驗室的機具設備及相關實驗目前很多仍在研發階段。

## 七、 拜會 SKB 公司

本次拜會由 SKB international 現任總裁 Magnus Holmqvist 先生與 SKB international 卸任總裁現在為 SKB international 資深顧問 Claes Thegerström 先生負責接待並進行簡報說明，而 SKB international 資深顧問 Hans Forsström 先生亦共同參與討論（圖 18），Magnus 先生簡介 SKB 公司的主要組織架構，如圖 19 所示，並說明 SKB 亦負責核能廢棄物營運之必要研究發展工作，每年並為各電力公司進行核子廢棄物營運之成本估算，作為瑞典輻射安全機關 SSM 審查每一度核能發電售電攤提費用之依據，並說明瑞典放射性廢棄物計畫與重要里程如表 2 所示。

加值計畫（Added Value Program）為 Magnus 先生簡報之重點，此加值計畫是由 SKB、經營核電廠的公司與兩個市皆同意的計畫，計畫經費用於教育、研究與地方企業，發展觀光、提升道路與碼頭設施、企業發展。另外，在選址的經驗分享上，提到必須尊重當地的民主制度、選址執行者需要說明所採用的科學技術、要讓人相信貯存設施對當地有益、選址執行者須在當地落腳，以進行長期溝通對話。而建立信任與接受度的主要關鍵因素為：要體認到公眾接受度的重要性、誠實且資訊公開、對話、擴展溝通的方式、讓民眾感覺存在且可及、尊重一些看是不重要卻可能是溝通對象看重的議題、要以創意並以當地可自然接受的方式進行溝通、盡可能融入當地社會。最後，SKB 與會人員認為瑞典用過核子燃料最終處置成功最關鍵要素有 3 個：科學正確、技術正確、公眾接受，成功建立地方政府與民眾的信心與信任。

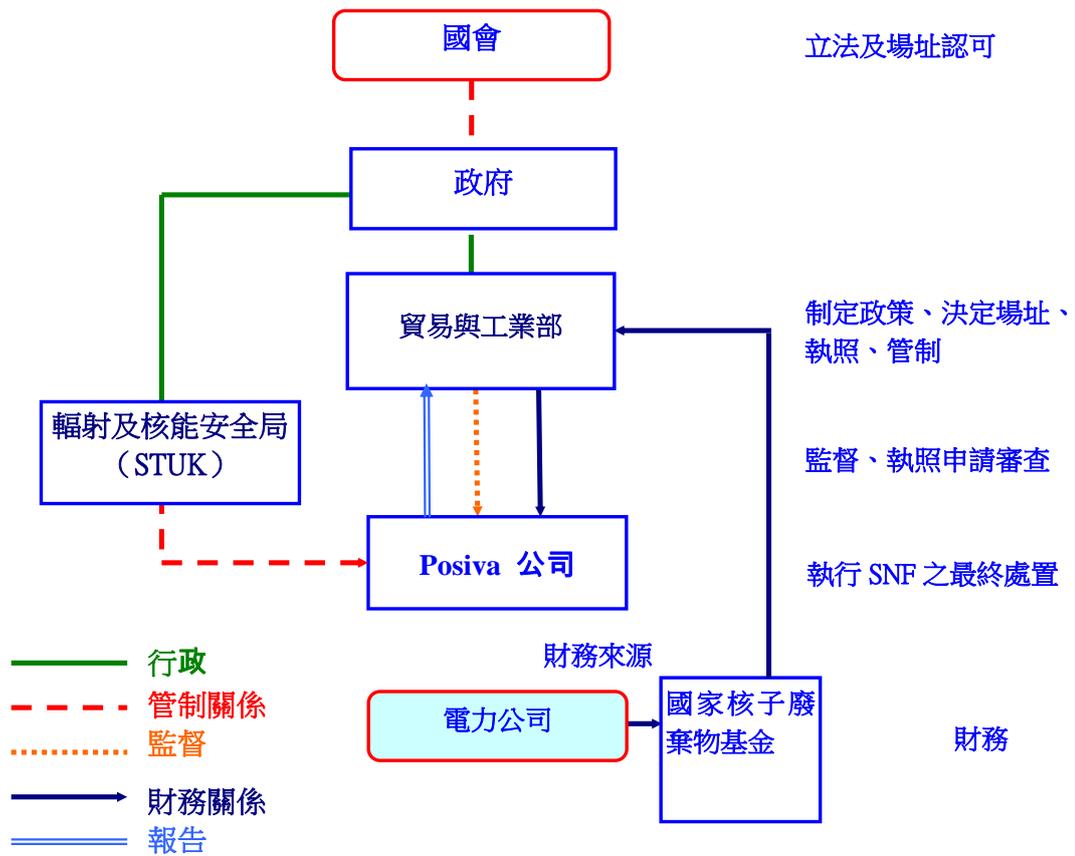


圖 1 芬蘭核能後端營運之組織架構

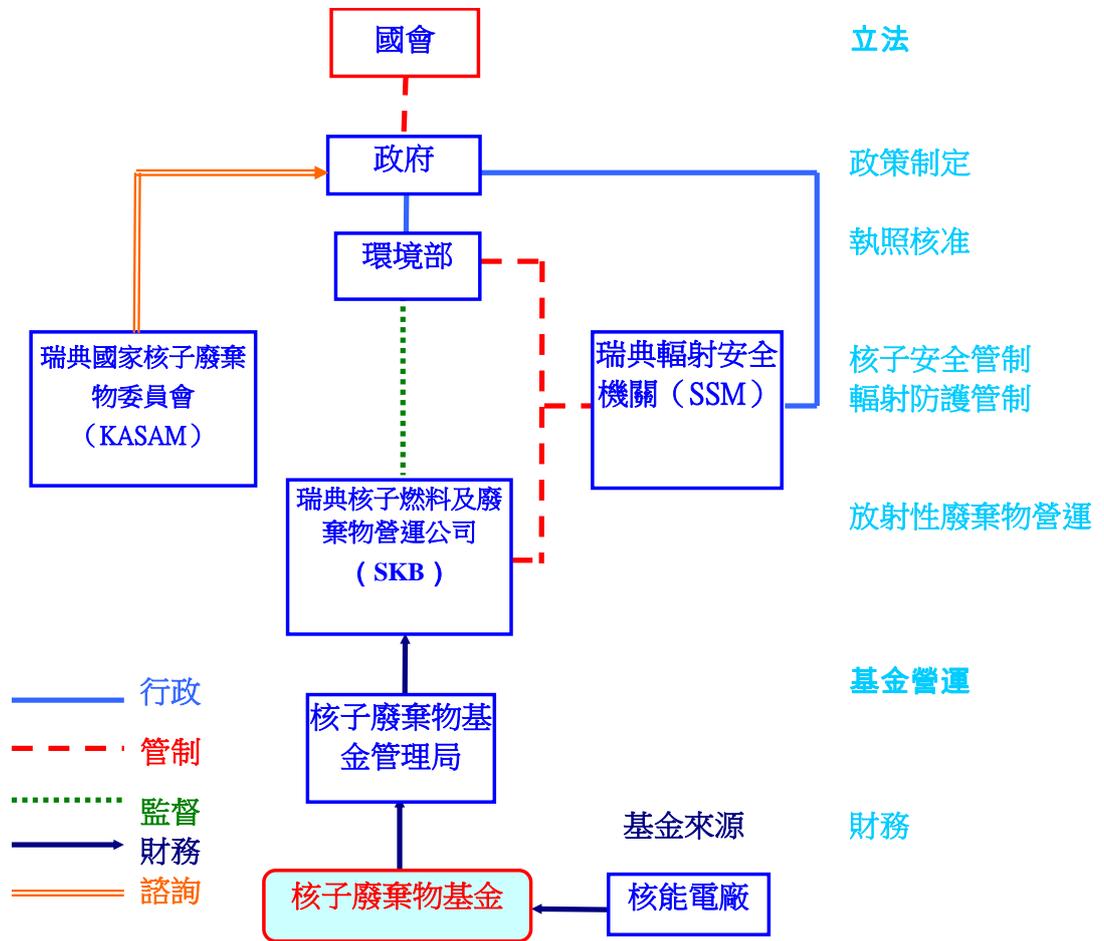


圖 2 瑞典核能後端營運之組織架



圖 3 拜會芬蘭輻射及核能安全局

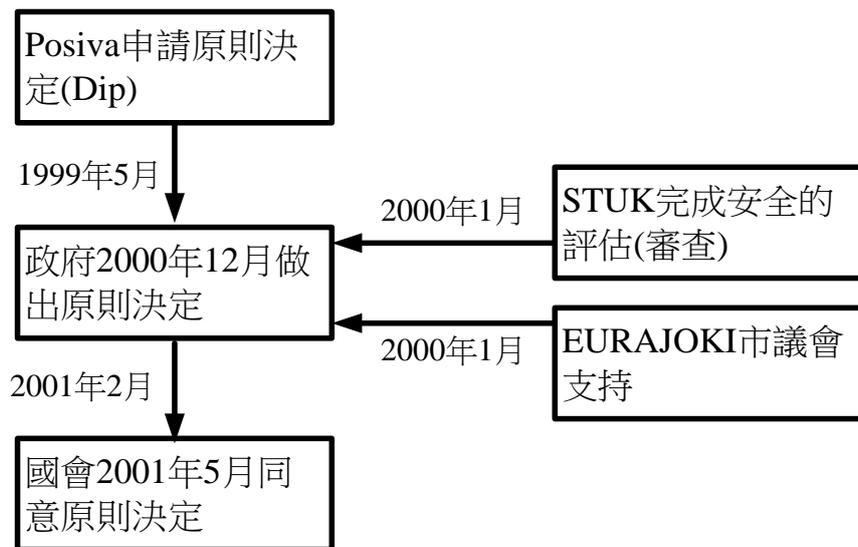


圖 4 芬蘭用過核子燃料最終處置場 DiP 過程

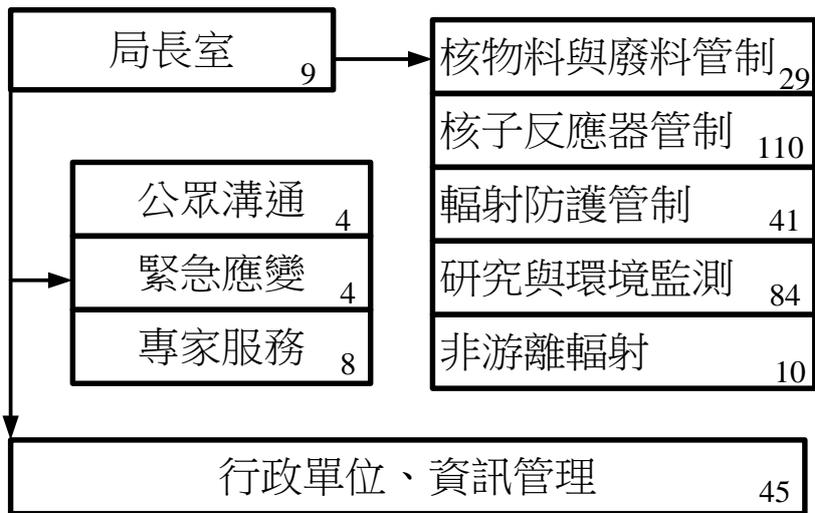


圖 5 芬蘭輻射及核能安全局(STUK)的組織架構圖



圖 6 與 Posiva 公司討論會議

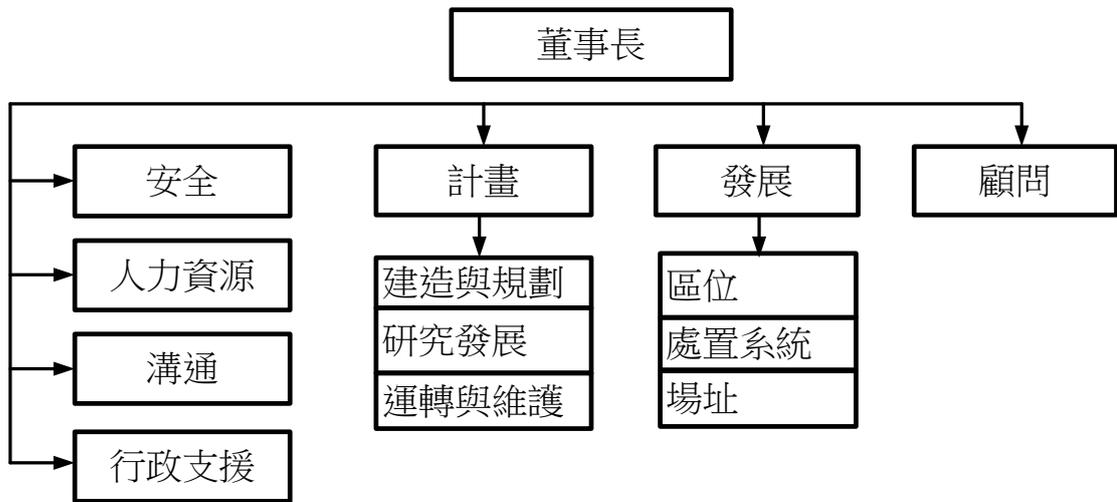


圖 7 Posiva 公司的組織架構

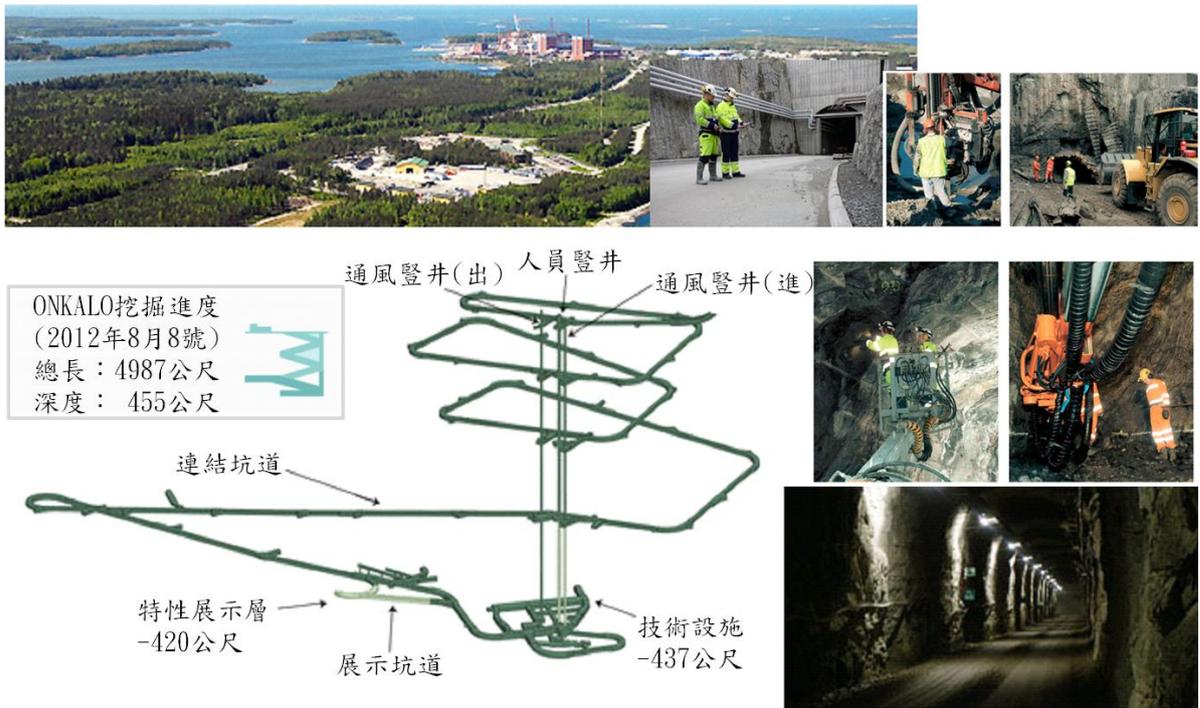


圖 8 芬蘭 ONKALO 地下實驗室

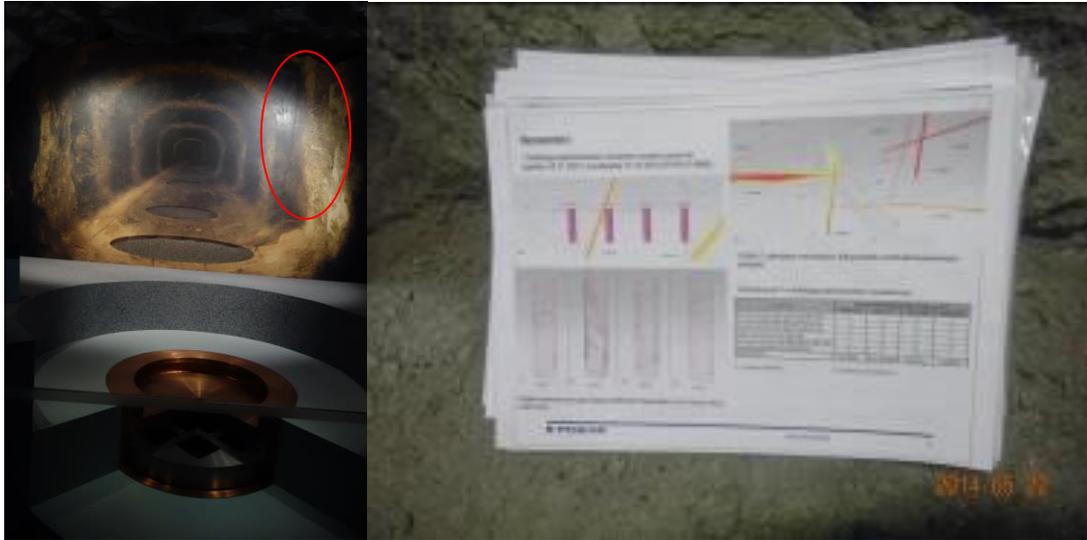


圖 9 芬蘭 ONKALO 地下實驗室裂隙或不連續面調查  
(第 2 個處置孔位因有不連續面通過，將來不會作為處置孔)

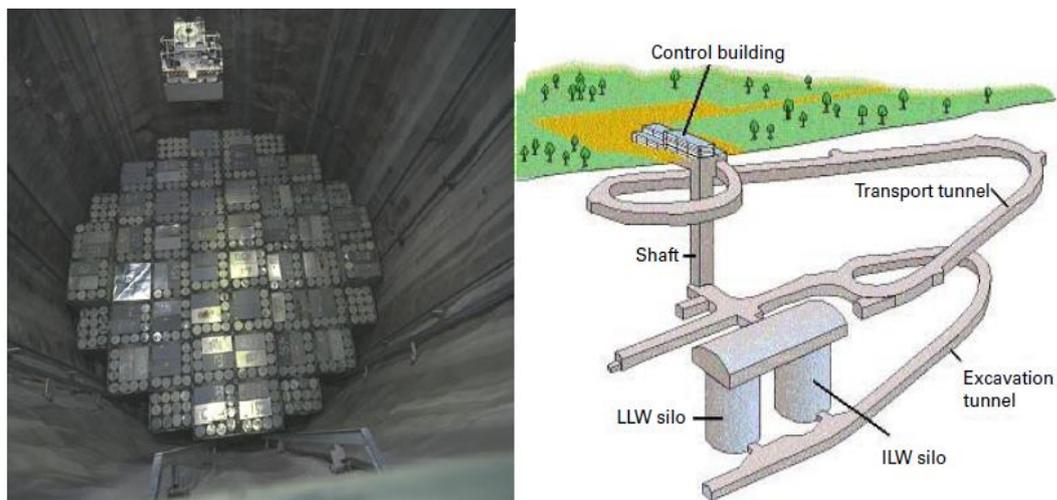


圖 10 芬蘭 Olkiluoto 中低放射性廢棄物處置之廢棄物桶(左)及處置設施示意圖(右)



圖 11 瑞典的核子廢棄物專用運輸船

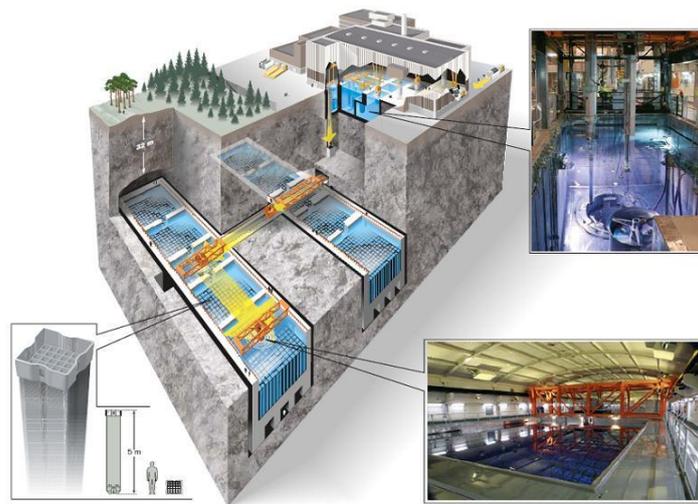


圖 12 CLAB 之佈置圖

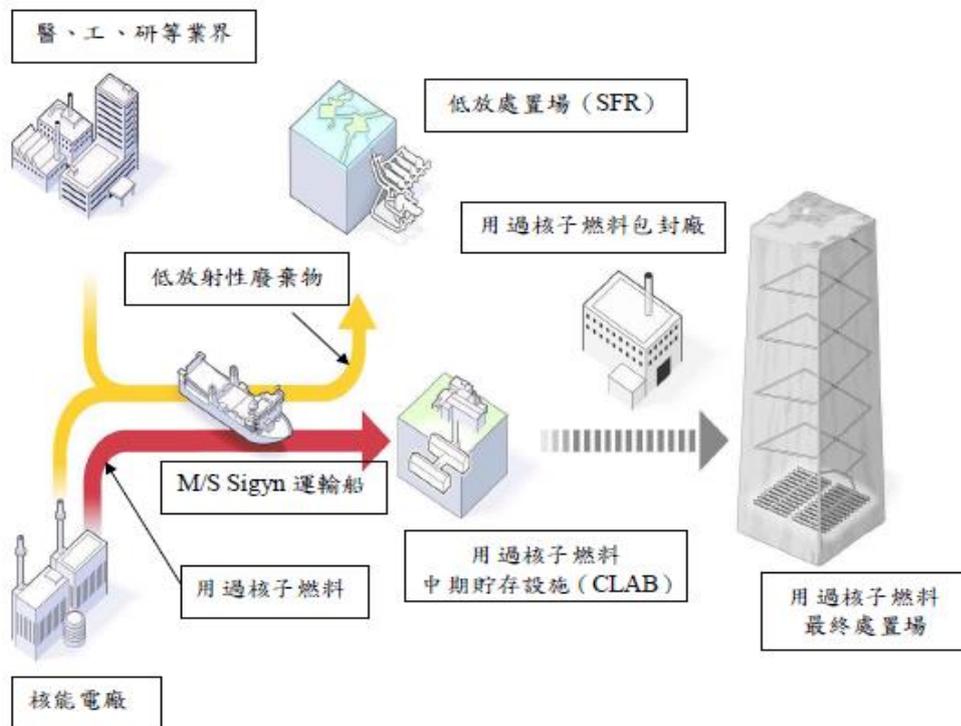


圖 13 瑞典放射性廢棄物營運體系示意圖



圖 14 SKB 廢棄物罐實驗室

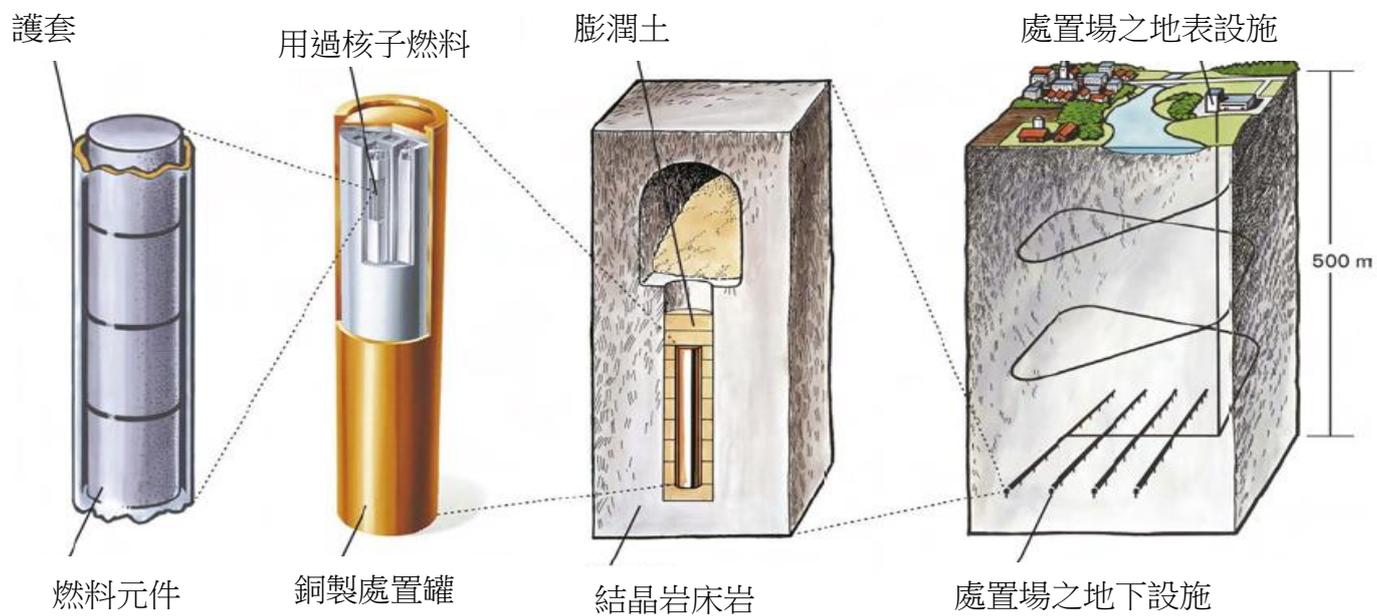


圖 15 瑞典 KBS-3 用過核子燃料最終處置概念



圖 16 摩擦攪拌銲接設備與銲接成品

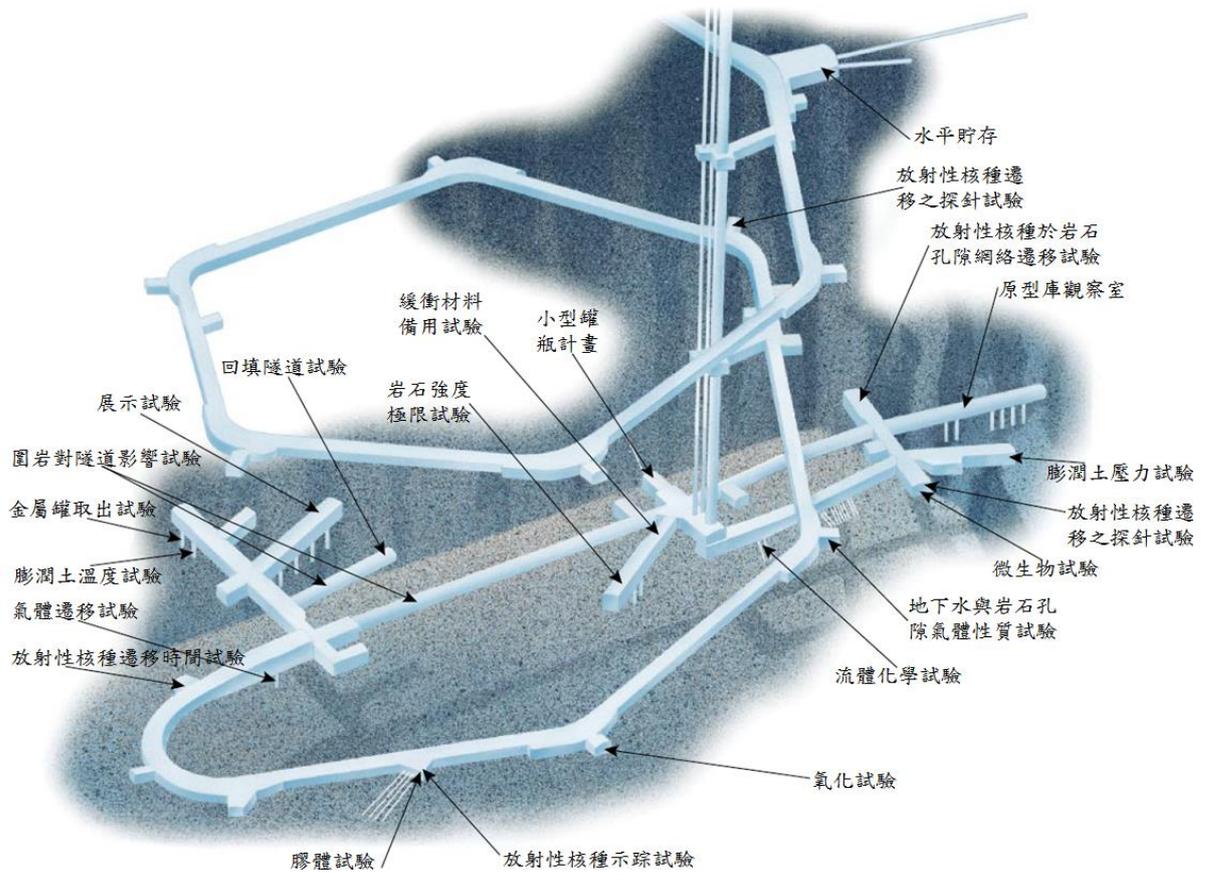


圖 17 瑞典 Äspö 地下實驗室示意圖



圖 18 與 SKB international 總裁 Magnus 及兩位 SKB 資深顧問開會

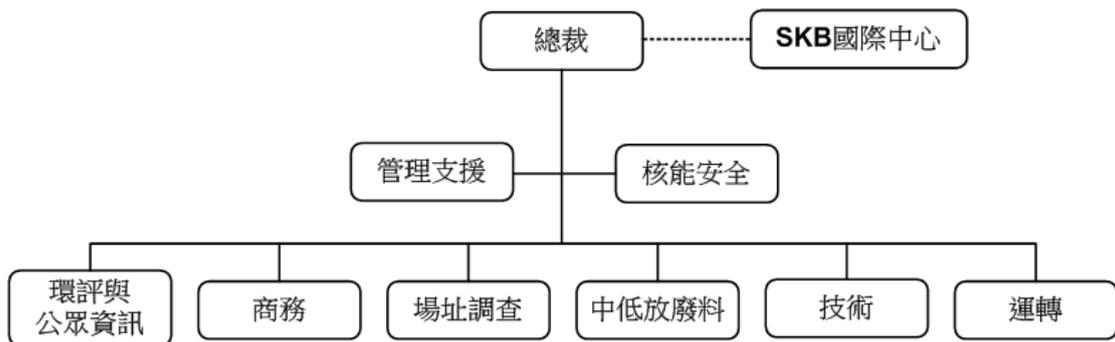


圖 19 SKB 公司的組織架構

表 1 芬蘭放射性廢棄物計畫與重要里程碑

1983 年展開高放射性廢棄物相關研究計畫
1985 年完成初步場址篩選
1987 年 Olkiluoto 核能電廠用過核子燃料貯存設施開始運轉
1992 年完成 5 處候選場址的初步調查(1987-1992)
1995 年成立 POSIVA
1996 年 Lovissa 電廠停止將放射性廢棄物運送至蘇聯處理
1999 年完成 4 處場址的詳細調查(1993-1999)
1999 年選定 Olkiluoto 核能電廠附近之 Eurajoki 作為用過核子燃料處置場址
1999 年 5 月 POSIVA 正式向芬蘭政府提出在 Okilouto 建造高放性廢棄物深層地質處置場的申請
2001 年 5 月芬蘭國會以 159 票贊成對 3 票反對的壓倒性投票結果，授權政府開始在 Okilouto 進行深層地質最終處置場的建造研究與後續的相關工作
2004 年 6 月開始建造 ONKALO-URL
2012 年 12 月提出最終處置場建照申請
預定於 2015 年開始興建封裝廠及最終處置場設施
預定於 2020 年申請處置場運轉執照
預定於 2050 年開始關閉處置場

表 2 瑞典放射性廢棄物計畫與重要里程

1970年代展開高放射性廢棄物相關研究計畫
1980年代展開最終處置場相關技術發展與研究
1985年用過核子燃料中期貯存設施開始運轉
1995年瑞典硬岩實驗室(Äspö-HRL)開始運轉
2001年選定Öskasham及Östhammar兩地候選場址
2002-2007年期間擇一候選場址進行場址調查
2009年6月公佈選定Östhammar的Forsmark為最終處置場址
2010年開始同始進行中期、包封及最終處置設施許可申請程序
2011年3月提出最終處置設施的建照申請
預定於2025年開始運轉處置場
預定於2050年代開始關閉處置場

#### 肆、心得及建議

本次考察芬蘭與瑞典放射性廢棄物設施的參訪活動，藉由與芬蘭 STUK 的實際交流，了解芬蘭對於放射性廢棄物的管制理念與規範，另外參訪芬蘭與瑞典的放射性廢棄物設施，並與芬蘭及瑞典的專責機構交流，其處置計畫推動及放射性廢棄物設施營運經驗可作為我國用過核子燃料最終處置計畫推動之參考。

以下就本次考察提出心得建議事項如下：

- 一、芬蘭在用過核子燃料最終處置展現出極大的決心，一旦決定用過核子燃料要在芬蘭國內處理，即專心致力於後續的選址工作，包括立即成立專責機構 Posiva 公司展開選址與民眾溝通、處置技術的研究等。而瑞典更早即成立 SKB 專責機構，有利於最終處置計畫的長期研發工作穩定性以及處置工程技術的累積。建議我國應儘早成立放射性廢棄物專責機構，以集中最終處置選址及研究能量。
- 二、核廢棄物已是國內存在的現實，也必須去解決，而要將此現實形成全國性共識，在此共識的基礎上，才能順利推展處置計畫工作。
- 三、多面向溝通是處置計畫成功的要素，芬蘭 Posiva 公司及瑞典 SKB 公司強調與民眾溝通的重要，如 Posiva 公司為強化與處置場所在地的溝通，長期租用當地一處莊園作為辦公室，強化與地方共存共榮的決心。SKB 公司在選定處置場址之前，也與地方協調提出加值計畫的激勵方案，並順利選出處置場址。兩個國家都不需要經由公投程序選定處置場。國內應參考該二國之作法，強化溝通作業，俾使處置計畫能更順利推展。
- 四、用過核子燃料最終處置計畫須經當地居民同意，時程難免會有所延誤，但皆不影響兩國的核能發展。目前芬蘭的 Olkiluoto 第三機組正在興建中，高放處置設施運轉時程略為延誤數年，瑞典的高放處置設施興建時程也配合主管機關的審查而略為延後，但調查結果兩國居民仍呈現支持核能發展的趨勢。
- 五、瑞典與芬蘭的專責機構都表示穩定的後端基金徵收是處置計畫成功的關鍵。兩國為防範核能政策的變化，皆訂有類似履約保證的規定，確保有足夠核能後端基金。國內核能後端基金應考慮納入類似機制，確保核能後端業務推動所需經費不虞匱乏。
- 六、芬蘭中低放射性廢棄物處置場及 ONKALO-URL 與最終處置場址均在

OKILUTO 電廠廠區，堪稱最佳規劃，芬蘭高放地下實驗室地下水少，花崗岩地質均勻度高，雖有少數破碎帶，但經由徹底對貯存孔 Mapping 及篩選，可利用現有實驗坑道擴充，鑽掘最終貯存坑，2022 年啟用之計畫，應有希望如期。

- 七、芬蘭 VLJ 中低放最終處置場採用個別 Silo 設計，瑞典則 Silo 及坑道併用；瑞典用過核子燃料最終處置場則基於地質安全考量，選定於 Ö skasham，雖異於芬蘭，但同以瑞典技術為基礎，而各有其通盤考量，可為我國借鏡。
- 八、處置計畫自地質鑽探之始，再經地下實驗區之選定，各種實驗室(如 Canister Lab、Encapsulation plant)之建立，以迄最終處置場址之選定，長期、透明及關心的地方溝通，獲取信任，是成功的要素。
- 九、瑞典「加值計畫」之回饋方式，由後端基金以外另支付，且非直接納入地方或私人口袋，而須經由申請、審查、確認對甲乙雙方均有利，且能創造更多價值(如創造工作機會、培養更多專業人才等)。
- 十、芬蘭及瑞典兩國在高低放之最終貯存，以及配合之高放中期貯存(瑞典 CLAB)，均有完整而長遠的規劃，過程中並投注相當的人力與經費，務以確保安全為考量，值得借鏡。我國有相對穩定的花崗岩地質，應進一步持續規畫相關實驗技術發展。
- 十一、瑞典、芬蘭目前用過核子燃料銅廢棄物罐之處置概念已發展更為經濟之水平貯存中，有可能取代垂直貯放，其試驗可長期追蹤及並考慮參與相關實驗。