





出國報告審核表

出國報告名稱：赴瑞典參訪 SKB 公司及考察放射性廢棄物營運設施

出國人姓名 (2人以上，以1人為代表)	職稱	服務單位
李彥宏	技術規劃專員	台灣電力公司核能後端營運處
出國類別	<input checked="" type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input type="checkbox"/> 其他 _____ (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	

出國期間： 104 年 5 月 16 日 至 104 年 5 月 25 日 報告繳交日期： 104 年 6 月 25 日

出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	2.格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」)
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	3.無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	4.內容充實完備.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	5.建議具參考價值
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	6.送本機關參考或研辦
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	7.送上級機關參考
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	8.退回補正，原因：
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 不符原核定出國計畫
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(5) 引用相關資料未註明資料來源
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(6) 電子檔案未依格式辦理
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	9.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表：
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(1) 辦理本機關出國報告座談會(說明會)，與同仁進行知識分享。
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(2) 於本機關業務會報提出報告
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	(3) 其他 _____
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	10.其他處理意見及方式：

報告人：  單位： _____ 主管： _____ 主管處： _____ 總經理： _____
副總經理： _____   
說明：
一、各機關可依需要自行增加審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務出國報告資訊網」為原則。

 副處長： _____ 

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴瑞典參訪 SKB 公司及考察放射性廢棄物營運設施

頁數 42 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/李彥宏/02-2365-7210#2241

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

李彥宏/台灣電力公司/核能後端營運處/技術規劃專員/02-2365-7210#2241

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：104.5.16~104.5.25

出國地區：瑞典

報告日期：104.6.25

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：

瑞典核燃料及廢棄物管理公司(Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB)，在最終處置技術領域內處國際上領先之地位。本公司為使用過核子燃料最終處置順利推動，由本公司與核能研究所組成考察團隊，目的除參訪瑞典放射性廢棄物營運設施，瞭解瑞典如何處理放射性廢棄物，並讓瑞典 SKB 更加瞭解國內處置技術的進展，尋找對雙方最有利的合作方法及未來進一步的合作方式。

考察的地方，包含位於瑞典 Forsmark 的中、低放射性廢棄物最終處置場 SFR 與位於瑞典 Oskarshamn 的廢棄物罐實驗室 Canister laboratory、用過核子燃

料中期貯存設施 Clab 及地下實驗室 Äspö hard-rock underground laboratory，並且赴 SKB 公司總部進行 2 次的技術交流與討論。

經本次考察及與 SKB 的交流討論，瞭解瑞典對於高、低放射性廢棄物處置設施的規劃及具體的進度，並使 SKB 公司瞭解國內目前的技術能力與計畫進展，達到相互瞭解，相信瑞典 SKB 在放射性廢棄物處理的豐富經驗，有相當多值得國內借鏡參考學習的地方。

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

出國報告(出國類別：考察)

赴瑞典參訪SKB公司及考察 放射性廢棄物營運設施

服務機關：台灣電力公司

核能後端營運處

姓名職稱：李彥宏 技術規劃專員

派赴國家：瑞典

出國期間：104年5月16日~104年5月25日

報告日期：104年6月25日

摘要

國內「用過核子燃料最終處置計畫」規劃為五個階段並依序執行，目前處於「潛在處置母岩特性調查與評估」(第一階段)，而本階段目標須於 106 年提出「用過核子燃料最終處置技術可行性評估報告(簡稱 SNFD2017 報告)」，此報告將確認地質處置工程技術能力是否完備，其目標如下：

- (1) 能否找到合適的花崗岩進行地質處置。
- (2) 地質處置工程技術能力是否完備。
- (3) 地質處置設施長期安全性評估之能力是否完備。

瑞典核燃料及廢棄物管理公司(Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB)，在最終處置技術領域內處國際上領先之地位。本公司為使 SNFD2017 報告能如期如質完成，並符合國際水平，由本公司與核能研究所組成考察團隊，目的除參訪瑞典放射性廢棄物營運設施，瞭解瑞典如何處理放射性廢棄物，並讓瑞典 SKB 更加瞭解國內處置技術的進展，進行技術交流與經驗交換。

考察的地方，包含位於瑞典 Forsmark 的中、低放射性廢棄物最終處置場 SFR 與位於瑞典 Oskarshamn 的廢棄物罐實驗室 Canister laboratory、用過核子燃料中期貯存設施 Clab 及地下實驗室 Äspö hard-rock underground laboratory，並且赴 SKB 公司總部進行 2 次的技術交流與討論。

經本次考察及與 SKB 的交流討論，瞭解瑞典對於高、低放射性廢棄物處置設施的規劃及具體的進度，並使 SKB 公司瞭解國內目前的技術能力與計畫進展，達到相互瞭解，相信瑞典 SKB 在放射性廢棄物處理的豐富經驗，有相當多值得國內借鏡參考學習的地方。

Abstract

According to the domestic final disposal plan named “Spent Nuclear Fuel Final Disposal Plan”, the plan is divided into five stages to carry out. The most main objective of the first stage named “Characterization and Evaluation of Potential Host Rocks for the Final Disposal of Spent Nuclear Fuel” is to finish the “Feasibility Assessment Report for the Spent Nuclear Fuel Final Disposal Technology (SNFD2017 report)” by 2017, and it will demonstrate that our domestic engineering ability of geological disposal is available. There are three missions shown below.

- i) To prove the granite rock bodies suitable for final disposal could be found in Taiwan technically.
- ii) To prove the disposal technology and engineering are ready for Taiwan.
- iii) To prove the assessment capability for the long-term safety of final disposal is ready for Taiwan.

The Swedish nuclear fuel and waste management company (Swedish: Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB) is located at the international advanced position in the area of final disposal technology. Taiwan Power Company (Taipower) in order to make SNFD2017 be good quality and finish on schedule as well as meet the international standard, Taipower and Institute of Nuclear Energy Research (INER) build a visiting delegation. The goal of the delegation is not only to visit the facilities of radioactive waste management in Sweden, but also to learn how to handle the radioactive waste in Sweden. In addition, it is necessary to let SKB understand domestic final disposal technical progress so that exchange mutual technologies and experiences.

The visiting places include the final repository for short-lived radioactive waste (SFR) in Forsmark, the canister laboratory in Oskarshamn, the interim storage facility for spent nuclear fuel (Clab) and Äspö hard-rock underground laboratory. Furthermore, there are two meetings related to technical exchange and discussion in the SKB’s headquarters.

After the visit and discuss with SKB, I understand that the plan and concrete progress related to high-, low-level final disposal facilities in Sweden, and let SKB understand domestic technical ability and plan progress at present, which achieve our mutual understanding. It is believable that many parts for us is worth to learn and refer related to radioactive waste management from abundant experiences in Sweden.

目錄

摘要.....	i
Abstract.....	ii
目錄.....	iii
圖目錄.....	iv
目的.....	1
壹、 過程.....	2
貳、 工作內容.....	3
一、 考察 Forsmark 最終處置場 SFR.....	3
二、 考察廢棄物罐實驗室 Canister laboratory.....	6
三、 考察用過核子燃料中期貯存設施 Clab.....	9
四、 考察地下實驗室 Äspö hard-rock underground laboratory.....	11
五、 赴 SKB 總部交流及討論.....	15
參、 心得.....	41
肆、 建議.....	42

圖目錄

圖一 考察設施在瑞典的相對位置圖.....	2
圖二 SFR 地面設施空照圖	18
圖三 SFR 地下設施在 Forsmark 的相對位置圖	18
圖四 SFR 地下設施配置圖	19
圖五 筒倉上部影像圖.....	19
圖六 SKB 的廢棄物罐實驗室外觀圖.....	20
圖七 內襯鑄鐵的製作方法圖.....	20
圖八 銅塊加熱擠壓成中空銅管圖.....	21
圖九 壓製成所需厚度之銅管成品圖.....	21
圖十 分段抽製製程示意圖.....	22
圖十一 廢棄物實驗室設備配置圖.....	23
圖十二 螺旋摩擦銲接機圖.....	23
圖十三 SKB 設計之摩擦銲接接頭.....	24
圖十四 銲接後拉力試驗之試片破壞圖.....	24
圖十五 螺旋摩擦銲接示意圖.....	25
圖十六 X 光攝影控制機圖.....	25
圖十七 超音波檢測設備圖.....	26
圖十八 廢棄物罐組件測試後展示圖.....	26
圖十九 瑞典中期貯存設施 Clab 剖面圖	27
圖二十 瑞典 Clab 中期貯存設施運作圖	27
圖二十一 中期貯存廠 Clab 的配置與作業概況圖	28
圖二十二 Äspö HRL 接待中心外的歡迎旗幟圖	28
圖二十三 Äspö HRL 接待中心內服務台上的歡迎旗幟圖	29
圖二十四 Äspö HRL 地理位置圖	29
圖二十五 Äspö HRL 坑道與地表設施圖	30
圖二十六 Äspö HRL 的 TBM 斷面圖	30
圖二十七 Äspö HRL 示意圖	31
圖二十八 Äspö 地質概念圖	31
圖二十九 Äspö 地區隧道不連續面分佈比較圖	32
圖三十 Äspö HRL 實驗隧道分佈圖	33
圖三十一 Äspö HRL 長期擴散實驗展示圖	33
圖三十二 Äspö HRL 氧化還原實驗展示圖	34
圖三十三 Äspö HRL 示蹤劑延滯實驗展示圖	34
圖三十四 Äspö HRL 大尺度注氣測試展示圖	35
圖三十五 Äspö HRL 回填與封塞測試展示圖	35

圖三十六	Äspö HRL 全尺度處置孔模型示意圖	36
圖三十七	Äspö HRL 處置機具(1)圖	36
圖三十八	Äspö HRL 處置機具(2)圖	37
圖三十九	核能研究所進行整體計畫的說明圖.....	37
圖四十	與 SKB 專家進行 SA1 說明圖.....	38
圖四十一	在 SKB 總部討論合作議題.....	38
圖四十二	核研所與 Raymond Munier 討論圖	39
圖四十三	TR-10-51 分析流程圖.....	39
圖四十四	初版 SNFD2017 評估模式流程圖	40

目的

國內「用過核子燃料最終處置計畫」規劃為五個階段並依序執行，目前處於「潛在處置母岩特性調查與評估」(第一階段)，本階段之第一項目標「用過核子燃料最終處置初步技術可行性評估報告(簡稱 SNFD2009 報告)」已於 99 年經主管機關原能會核備，而本階段另一項目標須於 106 年提出「用過核子燃料最終處置技術可行性報告(簡稱 SNFD2017 報告)」，此報告為本計畫重要階段性報告，將確認地質處置工程技術能力是否完備，報告目標如下：

- (1) 能否找到合適的花崗岩進行地質處置。
- (2) 地質處置工程技術能力是否完備。
- (3) 地質處置設施長期安全性評估之能力是否完備。

瑞典核燃料及廢棄物管理公司(SKB)，在最終處置技術領域內處國際上領先之地位，與芬蘭、美國是世界上唯三提送用過核子燃料最終處置場建照執照申請之國家，並且有相當豐富的國際合作經驗，同時最終處置場之母岩為花崗岩，與本階段報告目標一致。本公司為使 SNFD2017 報告能如期如質完成，並符合國際水平，於 103 年 6 月邀請瑞典 SKB 的專家舉辦國際同儕審查，同時技術團隊核能研究所也於 104 年 1 月與 SKB 專家召開技術研討會，兩次研討會使本計畫執行團隊發現應強化的地方與應進步的方向。嗣後，本公司與瑞典 SKB 簽訂專業服務契約，瑞典專家將擔任本計畫顧問，俾本此階段目標能順利達成。

本次考察團隊由本公司與核能研究所組成，目的除參訪瑞典放射性廢棄物營運設施，瞭解瑞典如何處理放射性廢棄物，並讓瑞典 SKB 更瞭解國內處置技術的進展，有利相關業務推動及執行。

壹、過程

自 104 年 5 月 16 日出發，迄 5 月 25 日返國(共計 10 天)，停留瑞典斯德哥爾摩(Stockholm)、福什馬克(Forsmark)及奧斯卡港(Oskarshamn)三地詳表一，其在瑞典的相對位置詳圖一。詳細訪問行程如下：

表一 訪問行程及工作內容

日期	地點與行程	工作內容
5 月 16 日(六)	台北到斯德哥爾摩	去程轉機
5 月 17 日(日)	台北到斯德哥爾摩	去程
5 月 18 日(一)	福什馬克	考察 SFR
5 月 19 日(二)	德哥爾摩	赴 SKB 公司討論
5 月 20 日(三)	奧斯卡港	考察 Canister Lab
5 月 21 日(四)	奧斯卡港	考察 Clab 及 Äspö-HRL
5 月 22 日(五)	斯德哥爾摩	赴 SKB 公司討論
5 月 23 日(六)	斯德哥爾摩	資料整理
5 月 24 日(日)	斯德哥爾摩到台北	返程轉機
5 月 25 日(一)	斯德哥爾摩到台北	返程



圖一 考察設施在瑞典的相對位置圖

貳、工作內容

一、考察 Forsmark 最終處置場 SFR

本次考察第一天 5 月 18 日星期一的行程是拜訪 Forsmark 中、低放射性廢棄物最終處置場 SFR(Swedish Final Repository)(圖二)，因位於管制區內，故我們先到位於處置場南方的一個小鎮 Forsmars Bruk，由瑞典 SKB 公司公關部門的 Linda Bergman 女士接待我們進入管制區。

Forsmark 位於瑞典 Uppland 北部的 östhammar Municipality，擁有 Forsmark Nuclear Power Plant 和瑞典中、低放最終處置場 SFR，同時在 2009 年 6 月被選為用過核子燃料最終處置場的場址。Forsmark Nuclear Power Plant 擁有 3 組沸水式(BWR)反應器，分別於 1980 年 12 月、1981 年 7 月及 1985 年 8 月商轉，營運者為瑞典國營的電力公司 Vattenfall，每年的發電量為 22,300 GW·h。

當我們進入管制區，先在其簡報室由 Linda 介紹 SKB 公司，包含他的設施、設備和營運情形，接著詳細說明 Forsmark 被選為用過核子燃料最終處置場的場址的歷程及中、低放最終處置場 SFR 設施的配置和現況。簡報室位於核電廠、SFR 和用過核子燃料最終處置場場址中間，從窗戶望出去，可以看到相關設施，簡報室內有相當多的文宣資料，包含瑞典文和英文版，是一個很適合進行民眾溝通的地方。

SKB 在選定用過核子燃料最終處置場場址過程，對當地的居民進行大量的溝通工作。SKB 在確定 Forsmark 地質合適後，對場址方圓 10 公里的居民約 250 戶，不但進行挨家挨戶的拜訪，同時舉辦 SKB 稱之 fika 的課程，fika 為在類似休息室的舒適環境下，讓居民一邊享受咖啡、一邊聆聽 SKB 專員的解說，前述過程大約進行了 14 年(1995-2009)。

當簡報結束，Linda 帶領我們進入中、低放最終處置場 SFR。SFR 位於 Baltic sea 海床底下約 50-60 公尺(圖三)，瑞典於 1970 年代末期即決定建造中、低放最終處置場，於 1982 年提出建造及運轉申請，經過

瑞典核能檢查署(Swedish Nuclear Power Inspectorate, SKI)及瑞典輻射防護(Swedish Radiation Protection Institute, SSI)審查一年，於 1983 年開始建造，並於 1988 年開始營運，可處置容量約 60,000 立方公尺的放射性廢棄物，每年接收約 600 立方公尺的廢棄物，除了核電廠產生之廢棄物也接收醫院、研究設施等產生之廢棄物，共約 30 位營運人員，每年營運費用約 4 千萬瑞典幣。

目前 SFR 的地下設施(圖四)由 4 條長約 160 公尺的岩窖(rock vaults)和 1 個深約 50 公尺的筒倉(silo)(圖五)組成，彼此以隧道相連。四條岩窖分別為 2 條 BTF、1 條 BLA 和 1 條 BMA，介紹如下：

(一) 岩窖(BTF)

用來處置混凝土櫃的岩窖，分為 1BTF 和 2BTF，1BTF 處置 1.灰燼的廢棄物桶、2.裝有廢離子交換樹脂及過濾器組件之混凝土櫃。2BTF 只處置混凝土櫃，此外，如蒸汽產生器等大型金屬組件也可以在此進行處置。最大容許表面劑量率為 10 毫西弗/小時，而主要放射性核種為 Co-60 及 Cs-137。寬為 14.8 公尺，高為 9.5 公尺。混凝土櫃之體積為 10 立方公尺，每一行有 4 個櫃子堆置 2 層。在最頂部放置一個混凝土蓋以作為輻射防護用。櫃與櫃之間隙仍用混凝土回填，而櫃與岩壁間則回填水泥與砂之混合體。

(二) 岩窖(BLA)

用來處置具短半衰期的放射性廢棄物，主要為低污染的廢金屬(鐵、鋼、鋁等)、纖維(如木材、紡織品、紙)及其它有機物質(如塑膠、電纜)等，最大容許表面劑量率為 2 毫西弗/小時，主要放射性核種為 Co-60。寬為 15 公尺，高為 12.5 公尺。用混泥土地板堆置廢棄物容器，堆置成三層高。

(三) 岩窖(BMA)

用來處置各種不同來源之廢棄物，主要處置以核電廠產生之離子交換樹脂及金屬組件，最大容許表面劑量率為 100 毫西弗/小時，主要核種為 Co-60 及 Cs-137，以廢棄物箱(moulds)及廢棄物桶兩種。寬為 19.5 公尺，高為 12.5 公尺，分成 15 個處置室，其廢棄物是利用遙控方式放置，處置室堆滿後在上面會放置一塊預鑄的混凝土板，並回填廢棄物與處置室之間隙。處置室封閉前混凝土結構物及岩壁間將利用砂回填。當岩窖封閉後，兩個入口處會被封塞。

(四) 筒倉(silo)

筒倉處置了整個處置設施 90%的活度，最大容許表面劑量率為 500 毫西弗/小時，主要核種為 Co-60 及 Cs-137，處置廢棄物以核電廠產生之離子交換樹脂及金屬組件為主，以遙控方式進行搬運。筒倉為圓柱體型混凝土建築，直徑約 30 公尺，容量約為 18,000 立方公尺，筒倉的壁厚 0.8 公尺，壁與周圍的岩石間用膨潤土回填，平均厚度為 1.2 公尺。底部為 1 公尺厚混凝土底板與 9:1 混合之砂/膨潤土混合層組成，其內包含為容納各種不同廢棄物包件而設計的不同尺寸之豎井(shaft)，平均可放置 4 箱大型的廢棄物包件、或 16 桶廢棄物，最大的豎井之截面積為 2.5 平方公尺，廢棄物之間的空隙是以多孔性混凝土回填。

SKB 計畫在 2020 年後擴建 SFR，以容納電廠除役產生之中、低放廢棄物，容量將為目前容量的三倍大，約 200,000 立方公尺，規劃將向下延伸，由目前 60 公尺深度延伸到約 120 公尺深，將多出 6 條岩窖，長度為 240-270 公尺。

二、考察廢棄物罐實驗室 Canister laboratory

5月20日星期三則是由 SKB 安排參觀位於 Oskarshamn 海港碼頭旁廢棄物罐實驗室，此實驗室同時也是 SKB 公司的重要研究與設計 (Research and Design, R&D) 單位，並做為廢棄物罐封裝技術與進一步的安全問題解決之發展研究中心，從 1988 年開始營運至今，成立的主要目的是開發廢棄物罐蓋板與廢棄罐體之銲接技術(全尺寸)，以及研發銲接後的相關品質查驗與非破壞性檢測技術(non-destructive testing, NDT)，特別是 2005 年 SKB 公司所研發螺旋摩擦銲接法(Friction stir welding, FSW)以及高真空電子梁銲接技術(High Vacuum Electron Beam Welding, EBW)，目前已經是瑞典廢棄物罐的封裝技術中心，提供廢棄物罐的詳細結構計算和驗證等相關實驗，以及廢棄物罐研發、製造和組裝過程中的 NDT 檢測。整個行程由 SKB 公司公關部的 Stefan Bergli 先生陪同參觀，並說明相關設施的功能與應用，廢棄物罐實驗室的外觀如圖六。

Stefan Bergli 先生首先簡報 SKB 廢棄物罐的製作方法，SKB 在製作過程則是將廢棄罐分成銅殼製作和內襯鑄鐵製作兩條生產線。內襯鑄鐵的製作方法有兩種(詳圖七)，首先將模具填滿高溫熔融狀態的鐵，第一種方法是採用從頂部澆鑄灌製，將熔融狀態的鐵從模具頂部垂直向下灌鑄；另外一種方法則是透過一個灌注管從底部灌鑄，隨著灌注量的增加逐漸向上填補，經 SKB 的研究發現兩種灌鑄方法在品質上無任何顯著差異。灌鑄後則是需要經過幾天的冷卻方可移除模具，但最重要的是要確保鑄鐵內的模管必須是筆直不可彎曲，以確保後續燃料組件置入後而不致產生卡住不順等安裝問題。為了提升整體鑄鐵生產線的材料性能和製造過程的品質，SKB 公司也和瑞典鑄造協會(Swedish Foundry Association, SFA)合作開發電腦控制系統，利用電腦軟體與新技術來控制熔融狀態鐵的填充過程與冷卻階段之性能穩定，並在申請執造的審查文件中描述相關內容。

銅殼的部分則是分成銅管、上蓋和底板三個部分，生產過程中都利用超音波及 X-ray 等非破壞檢測方式來確認無任何損傷或缺陷，製作的方法可分成三種，分別是滾壓製作、熱擠出和分段抽製。滾壓製作是將銅塊滾壓成銅板後，在彎成圓形後進行縱向銲接，該法的縱向銲道易受熱影響會改變其晶粒結構及應力分布，此法適用於厚 30-40 公厘左右較薄的銅管。熱擠出則是先將銅錠/銅塊置入壓製機組中，初步將銅塊加熱擠壓成中空銅管(圖八)，再置入 30,000 噸壓模機中壓製成所需厚度之成品(圖九)。

分段抽製則是先將銅錠熱壓成較大直徑之短銅塊，置入 4,000 噸垂直式壓模機中壓製，然後再置於 1,500 噸水平式壓模機中壓製，在製程中需再加熱壓制，此法可保留銅底板一體成形，製程示意圖如圖十所示。而銅罐的頂部和底部則採用高溫鍛造方式製作。

廢棄物罐實驗室的整體設施配置圖如圖十一所示，主要有 7 個重要設施分別為：(1)燃料吊裝天車；(2)螺旋摩擦銲接機；(3)自動銲接機；(4)X 光攝影控制機；(5)銲接超音波檢測機；(6)廢棄物罐組件超音波檢測區；(7)氣墊搬運設備。首先參觀的是實驗室最負盛名的螺旋摩擦銲接機(圖十二)，其乃是設計一種旋轉接頭(圖十三)並塞到預定銲接的兩個物件之間隙(廢棄物罐和蓋板間)，透過工具進行摩擦加熱達 850 度後將前述兩個物件銲接相連，有別於一般傳統銅銲接方法，此法機具特殊，有些類似國內鋼筋之摩擦銲接續接法，皆是利用摩擦生高熱融化母材直接融合，不須使用銲條，但此熱度僅使銅產生塑性狀態，並未達熔點溫度，該銲接方法可採用和母材相同的材料進行銲縫，並可確保廢棄物罐銲道兩側的銅材料可以完美銲接，就異電位腐蝕和銲道腐蝕的觀點來看，也可避免後續長期處置造成的腐蝕缺陷破壞，Stefan Bergli 先生也展示利用該技術對金屬試片進行銲接後，再進行拉力試驗來驗證破壞處非原

銲接點(圖十四)。銅廢棄罐銲接示意圖如圖十五所示。

接著參觀幾個銲接檢測機，包含 X 光攝影控制機(圖十六)與超音波檢測(圖十七)兩類型設備，透過上述這兩種非破壞檢測方法來驗證廢棄物罐的各組件在製作或組裝過程中是否發生瑕疵或產生損壞，在整個製作過程中，銅殼和鑄鐵內襯則是採用超音波檢測法來確認其品質，而廢棄罐頂蓋和底板的銲接和銲縫處則是採用 X 光攝影控制機和超音波檢測進行雙重檢驗。SKB 的超音波檢測法是採用一種壓電晶體變化來判斷銅的品質，當受到特定超音波掃描下此種壓電晶體會因為銅殼厚度的差異而產生不同的振動頻率，這種壓電效應也可做為建立振動頻率和材料性能間的關係連結，當這樣的壓電晶體在銅殼表面和超音波探頭產生訊號的反射時，透過數位資料擷取則可找出相對的缺陷、不規則、裂縫或損傷等資訊，並確認其相對位置和這些缺陷的損傷程度。除了上述兩種非破壞檢測方法外，SKB 近年也針對壓敏檢測和渦流檢測進行研發，以確認廢棄物罐的表面缺陷，快速便利是採用此方法的優點。

此外，SKB 的廢棄物罐實驗室也放置許多測試後全尺寸相關的廢棄物罐組件(圖十八)，除了作為試驗展示外，也可供後續相關品質檢核或新技術開發後的驗證試片之用。

三、考察用過核子燃料中期貯存設施 Clab

本次考察在 5 月 21 日星期四上午安排至瑞典用過核子燃料集中式(濕式)中期貯存廠(Clab，瑞典文縮寫)進行參訪。該貯存場位於 Oskarshamn 北方約 20 公里處，緊鄰 Oskarshamn 核能電廠，於 1985 年開始營運接收瑞典所有核能電廠用過核子燃料並進行中期貯存(Interim storage)。瑞典用過核燃料在退出爐心後原則上在各核電廠內燃料池貯存至少 1 年至數年後，即以運輸船 M/S Sigrid 運至 Clab (Oskarshamn 核電廠例外，以陸運為之)附近碼頭，再陸運轉至 Clab 進行長達 30-40 年的濕式中期貯存，最後目標則於換裝入最終處置廢棄物罐後，再以海運及陸運方式送至北方約 400 公里處之最終處置場場址 Forsmark。

Clab 在 1985 年即開始興建並進行用過核子燃料接收，以今日科技水平來看部份機具與操作方式雖略有過時，但以當年科技發展程度而言，在觀念與設計上應屬先進。為確保安全，Clab 以“較保守設計(over design)”為主，包括濕式貯存燃料池位於地下 30-40 公尺處以有效降低保全及故意破壞顧慮，以及燃料池結構與地下岩石間設有防震動傳遞裝置以大幅降低地震的影響等。

Clab 設施剖面如圖十九，圖面遠端即為用過核子燃料進廠接收處理設施，燃料接收後以水下處理方式經多次傳送、分裝後送至地下貯存池貯放。圖二十為 Clab 接收、處理、分裝、貯存用過核子燃料之操作示意圖，以下分別說明其基本操作概念：(1)用過核子燃料以運送護箱運入 Clab 接收區後，先吊運至冷卻區並於其外加裝防護外包裝，以避免運送護箱受到廠內池水之可能污染而不易迅速出廠執行再運送；(2)用過核子燃料於運送過程中為乾燥狀態，故於此時需灌水入運送護箱內以再度冷卻用過核子燃料，同時也對運送護箱進行初步除污；(3)運送護箱吊運至操作池再轉運至換裝池，於此地將運送護箱內用過核子燃料分裝至 Clab 專用之貯存用提籃，最後將提籃送至指定位置貯存；(4)運

送護箱於保持表面不與 Clab 廠內池水接觸下，循反方向逐步退出廠外再回去執行運送工作。

Clab 原設計總容量為 4,000 噸鈾重之用過核子燃料(瑞典 BWR 燃料每束總重約 300 公斤，鈾重約 186 公斤；PWR 每束燃料重約 620 公斤，鈾重約 430 公斤)，後續擴充至 8,000 鈾重之容量，足可容納所有瑞典核電廠壽命期間(含可能之延壽)產生之用過核子燃料貯存之用。Clab 目前每年約接收 220 噸鈾重之用過核子燃料，加上一些爐心高放射性廢棄物(如更換下來之爐心偵測設備)；其每年營運費用約在 5.6 億台幣，員工數約在 100 人左右。

如果 2011 年送入申請建造執照之最終處置場(Forsmark)分析報告於近期內獲得核准，SKB 規劃將於 Clab 現有廠房地面外側同步建立用過核子燃料封裝廠(Encapsulation plant)。此封裝廠之預定位置為圖十九之近端，即在用過核子燃料地下貯存池之上方靠現有接收廠房處。當最終處置場可正式營運時，在 Clab 之用過核子燃料將於密封空間內以遙控或自動方式執行乾燥、置入最終處置廢棄物罐、廢棄物罐封銲以及表面除污、以及以特殊運送護箱短暫陸運加長程海運至最終處置場之工作，Clab 的配置與作業概況詳圖二十一。

四、考察地下實驗室 Äspö hard-rock underground laboratory

參訪 Äspö 硬岩實驗室(Hard Rock Laboratory, HRL)是此次考察 5 月 21 日星期四下午的行程，由 SKB 的 Roland Johansson 先生負責接待與解說。從接待中心外的旗幟(圖二十二)以及接待中心的服務台旗幟的擺設(圖二十三)都有本國的國旗，顯示 SKB 對此次考察的重視。

Äspö 硬岩實驗室(Hard Rock Laboratory, HRL)於 1995 年開始運轉至今，與實驗室合作的國家與單位包括：法國(Agence Nationale pour la Gestion des Déchets Radioactifs, Andra)、德國(Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, BMWi)、英國(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)、日本(Nuclear Waste Management Organization of Japan, NUMO)、日本(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)、日本(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)、加拿大(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)、芬蘭(Posiva Oy)、瑞士(Nationale Genossenschaft für die Lagerung Radioaktiver Abfälle, Nagra)和捷克(Radioactive Waste Repository Authority, RAWRA)，其中，Andra, BMWi, NDA, NUMO, CRIEPI, JAEA, NWMO 和 Posiva 與 SKB 組成 Äspö 國際聯合委員會(International Joint Committee, IJC)共同協調實驗的進行(SKB, 2013)。其相關說明如下。

(一) 場址位置與地層特性

Äspö HRL 位於瑞典東南方的 Oskarshamn 市之 Simpevarp 區(圖二十四)，該實驗室主要目的是作為用過核子燃料最終深地層處置場之設計與建造研究。地下實驗室入口位於 Simpevarp 半島，以螺旋隧道下降至地下深度 460m 的 Äspö 南端(圖二十五)，隧道總長約 3,600m，主要隧道開挖以傳統的炸挖方式進行，最後的 400m 才以全斷面挖掘機(Tunnel Boring Machine, TBM)進行直徑 5m 的開挖(圖二十六)，地下隧道與地面以一條升降豎井與兩條通風豎井連接(圖二十七)。

由地表地質探勘可知 Äspö 地區主要岩層有四種，分別為：Äspö 閃長岩(Diorite)、Småland(Ävrö)花崗岩、細粒花崗岩(Fine-grained granite)和 greenstone(Rhén et al., 1997)，並由鑽井地層研究發現在主要岩層之外並夾雜細晶岩(aplite)、玄武岩或偉晶岩(pegmatite)岩脈(Staub et al., 2003)。Äspö 地區地質概念模式如圖二十八。此區域主要不連續面有 NE-1、2、3、4 和 EW-3、5、7，其中 NE-2 在地表探勘時並未發現，不連續面之概念圖與實際分佈圖差異比較詳圖二十九。

(二) 實驗隧道

Äspö HRL 實驗隧道分佈如圖三十。Äspö HRL 運作進行主要區分成 6 個主要部門，包括：

1. 地工障壁與岩石工程 (Geotechnical barriers and rock engineering, TDG)：主要進行安裝緩衝材料、回填材料技術的研發、測試與驗證，並處置孔和探勘鑽孔的回填密封技術研發。
2. 機械與系統工程(Mechanical and system engineering, TDM)：主要進行處置場所需之設備、機具與載具的研發、測試與驗證。
3. 實驗部門(Project and experimental service, TDP)：主要進行在 Äspö HRL 實驗相關之管理、設計、安裝、量測與監測等。
4. 公關部門(Public relations and visitor services, TDI)：提供 Äspö HRL 相關公關資訊。
5. 廠房維護部門(Facility operation, TDD)：主要進行 Äspö HRL 辦公室與地下廠房的運轉維護，並開發、運轉和維護監管系統。
6. 品管部門(Administration, quality and planning, TDA)：進行計畫、報告、品質、經費與環境等相關的管理工作。

(三) 計畫歷程

Äspö HRL 計畫從 1986 年開始規劃，歷經 3 個主要階段，包括第一階段(1986-1990)：場址特性調查；第二階段(1990-1994)：建造階段；第三階段(1995-)：運轉階段。

實驗區分成：地下水流與核種傳輸(Groundwater Flow and Radionuclide Transport)、岩石力學(Rock Mechanics)、工程障壁(Engineered Barriers)、原型處置場(Prototype repository)以及廢棄物吊運(Waste Handling)五部份。

地下水流與核種傳輸主要進行：二相流實驗(Two-phase flow project)、膠羽實驗(Colloid project)、放射性核種延滯實驗(Radionuclide retention experiment, RNR)、長期擴散實驗(Long-term diffusion experiment, LTDE，圖三十一)、岩塊流體化學實驗(Matrix fluid chemistry experiment)、氧化還原實驗(Redox experiment in detailed scale, Rex，圖三十二)、示蹤劑延滯實驗(Tracer retention understanding experiments, TRUE，圖三十三)、微生物實驗(Microbe project)。

岩石力學主要進行開挖擾動帶相關研究(Zone of excavation disturbance experiment, ZEDEX)和岩柱穩定實驗(Pillar stability experiment)。

工程障壁主要進行緩衝材料長期效應實驗(Long-Term test of buffer materials, LOT)、大尺度注氣測試(Large-scale gas injection test, Lasgit，圖三十四)、回填與封塞測試(Backfill and plugging test，圖三十五)和緩衝材料溫度效應實驗(Temperature buffer test)。

原型處置場相關研究包括全尺度(Full-scale)和模式測試(Model testing)。全尺度處置孔模型如圖三十六所示，處置孔內展示膨潤土與廢棄物罐的裝填情形。

廢棄物管理包括水平處置(Horizontal emplacement)、垂直處置(Vertical emplacement)和處置罐回收測試(Canister retrieval test)的研究。處置機具如圖三十七和圖三十八所示，該機具由SKB與日本共同開發，在機具中央設置廢棄物罐垂直導向槽，同時配合現場實際處置孔，進行處置程序演練與技術訓練。

五、赴 SKB 總部交流及討論

5 月 19 日第一次參訪 SKB 公司，預定與瑞典 SKB 公司就核能研究所 104-107 年度計畫內容進行討論，並說明 SNFD2017 安全評估工作的細節報告。核能研究所簡報人員有副主任黃毓皓(詳圖三十九)、組長吳元傑、陳智隆及吳弘任，分別簡報有關最終處置整體計畫簡介、工程設計技術研究發展、安全評估技術發展及針對 SNFD2017 計畫的安全評估工作(Safety Assessment 1, SA1)。SKB 參與人員由左而右分別為：Jan-Olof Selroos、Hans Forsström、Magnus Holmqvist、Allan Hedin、Johan Andersson(圖四十)，分別擔任地下水與核種遷移研究並安全評估分析負責人、SKB International 的資深顧問、SKB International 的總裁、安全評估主要技術領導等。

簡報內容關於工程設計方面，包括 SNFD2017 計畫之工作項目、安全評估參數需求、長期處置工程發展等方面。目前已經建立參考案例，後續時程將就參考案例執行本土化分析驗證，並提出五個子項計畫、共 19 個細項計畫，由燃料特性研究開始，直到處置場建造、運轉等一連串相關研究，以便能達到主管機關要求之工程能力展現目標，除了 SNFD2017 計畫的短期目標，各細部工作項目在簡報時亦提出後續的長期發展方向。

5 月 22 日第二次赴 SKB 總部討論未來合作議題，本日參與討論的人員有 Hans Forsström、Magnus Holmqvist 與水文地質專長的 Jan-Olof Selroos(圖四十一)，先與 Jan-Olof 先生就離散裂隙網格模型進行討論；緊接著與地震地質專業的 Raymond Munier 先生進行剪力位移驗證相關的討論。

首先由核能研究所針對潛在合作議題，進行簡報說明，其內容包含氣候變遷參考演化、處置孔內剪力位移驗證、離散裂隙網格模型、使用程式與安全評估流程以及處置設施製造管理共 5 項議題。並依議題分段

討論方式進行，希望能由 SKB 方面提供建議或主動共同參與技術建立驗證計畫等。

其中最主要討論的議題為離散裂隙網格模型(Discrete fracture network, DFN)建立。與安全評估中的核種遷延(Radionuclide transport)與質點傳輸(Particle tracking)相關，質點傳輸建立在地下水流模型上，地下水流模型則是推導自 DFN 模型，故 DFN 為安全評估技術之重要上游資訊，能提供質點傳輸與排放點等相關資訊。此議題未來 SKB 將以建立 SR-Site 的 DFN 方式，針對已有的現地量測資料轉換為一個可以使用於 SNFD2017 報告內的 DFN 模型，協助國內團隊完成安全評估，後續也將多次來台討論此議題，亦列為後續討論重點。另外，Jan-Olof 先生也就先前與核研所討論的內容提出交流。

另關於氣候變遷的參考演化議題，核研所向 SKB 說明台灣情況，因台灣處於亞熱帶，僅有 3,000 公尺高山有冰河遺跡，不會受到冰河直接影響，所以重點考量海平面升降，其參考資料為 C. Waelbroeck et al. / Quaternary Science Reviews 21 (2002)，著重於未來海平面升降與冰河週期造成的地形變化，之後核研所將給予 SKB 參考演化較完整的英文版說明，讓 SKB 能給予更完整的意見。

與 Raymond Munier 討論關於地震剪力位移驗證議題(圖四十二)，由核研所吳元傑副研究員加強說明核研所在受震位移評估中，進行地震模擬驗證計畫之背景，由於核研所過去曾執行核能電廠地震模擬計畫，對地震模擬之過程與方法有經驗，且國內地震模擬領域研究亦有一定基礎，故針對裂隙受震模擬這個新的研究題目，國內專家可透過驗證計畫進行經驗交流。

至於程式選用與評估流程方面，核研所根據 SKB 的報告 TR-10-51(圖四十三)與 TR-14-11 的流程建立國內的評估流程，基本上會

採用與 SKB 相同之分析軟體，初版評估模式流程圖(圖四十四)為其各軟體串聯方式，SKB 表示未來將赴台進行更深入的討論。另關於處置設施製造，核研所也希望 SKB 能提供更為細部的技術報告，但因此部分並非現階段的目標，SKB 建議應先將重點放於 SNFD2017 報告上。

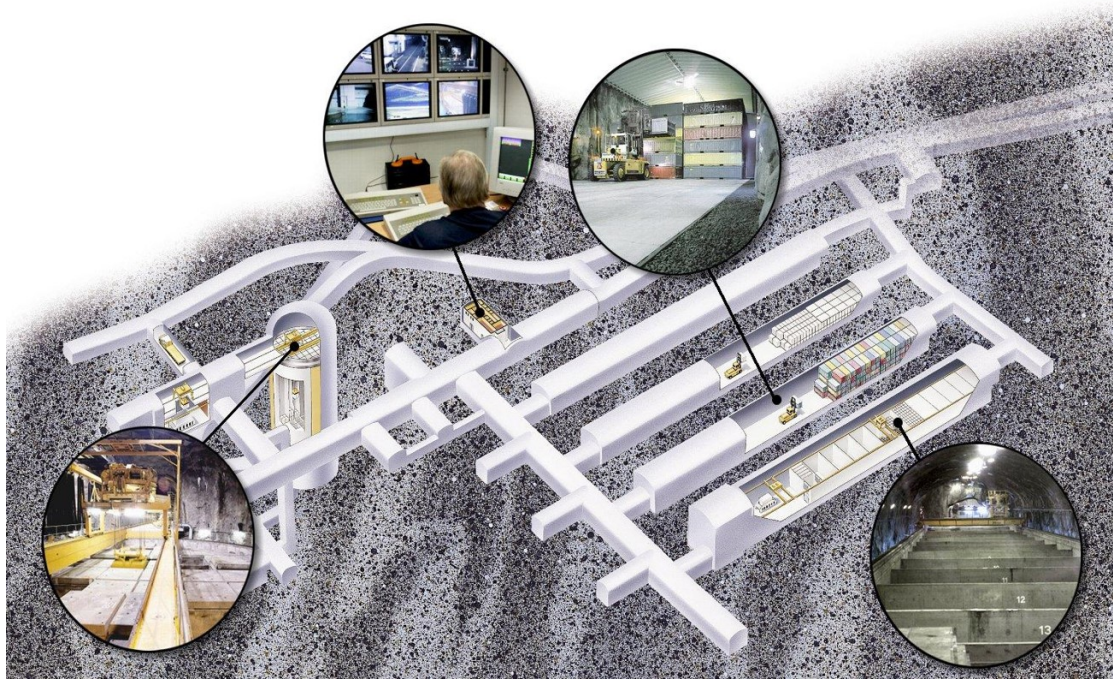
在此會議中，核研所與 SKB 討論議題與進步方向，將做為未來雙方合作的基礎。



圖二 SFR 地面設施空照圖



圖三 SFR 地下設施在 Forsmark 的相對位置圖



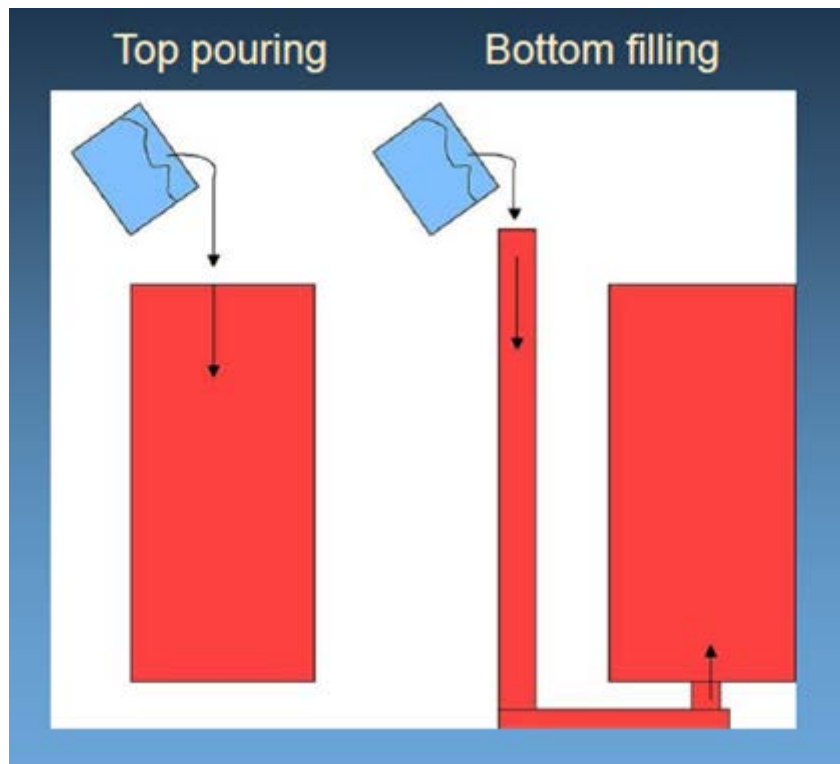
圖四 SFR 地下設施配置圖



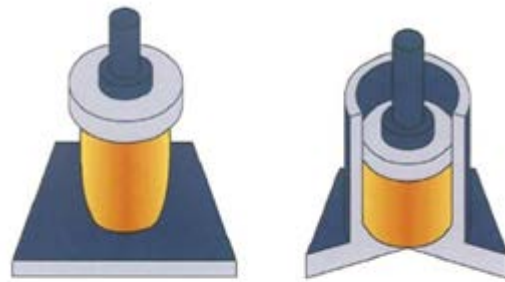
圖五 筒倉上部影像圖



圖六 SKB 的廢棄物罐實驗室外觀圖



圖七 內襯鑄鐵的製作方法圖



Axial compression of ingot to suitable diameter



Piercing of a centre hole with a mandrel



Pushing out of bottom plate

圖八 銅塊加熱擠壓成中空銅管圖



Placement of blocker in press



Insertion of mandrel into blocker

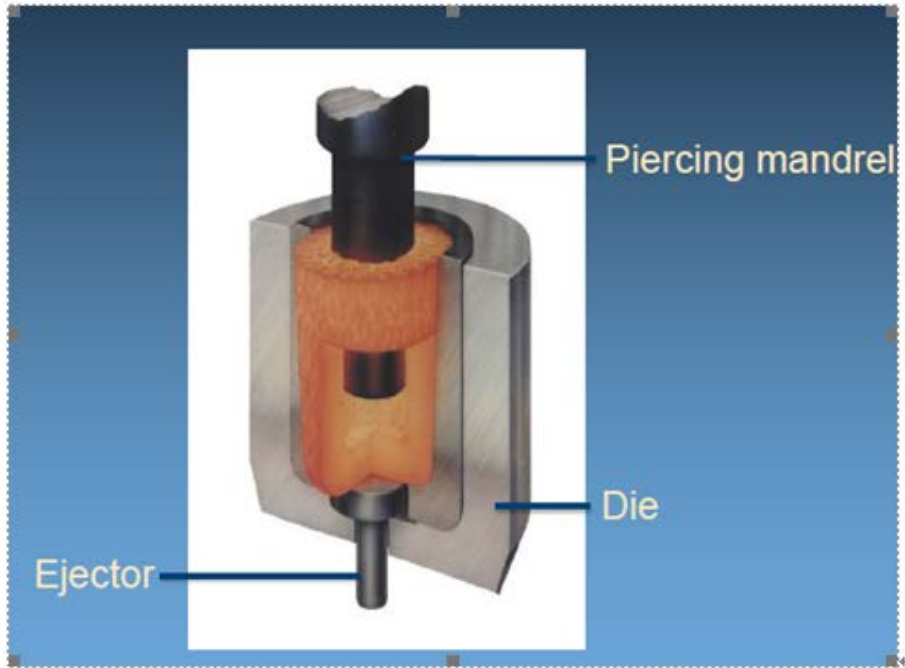


Pressing down of matrix on the blocker

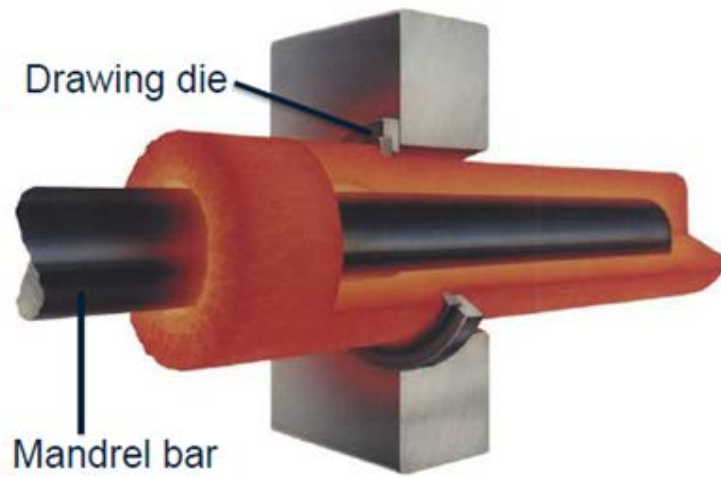


Lifting out of copper tube

圖九 壓製成所需厚度之銅管成品圖

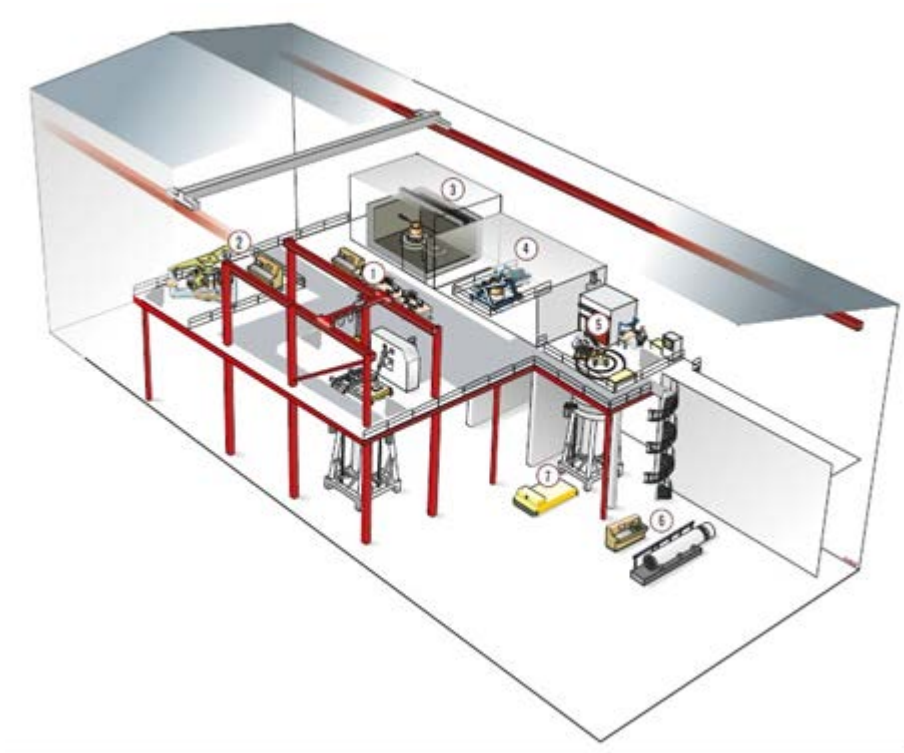


(a) 垂直式

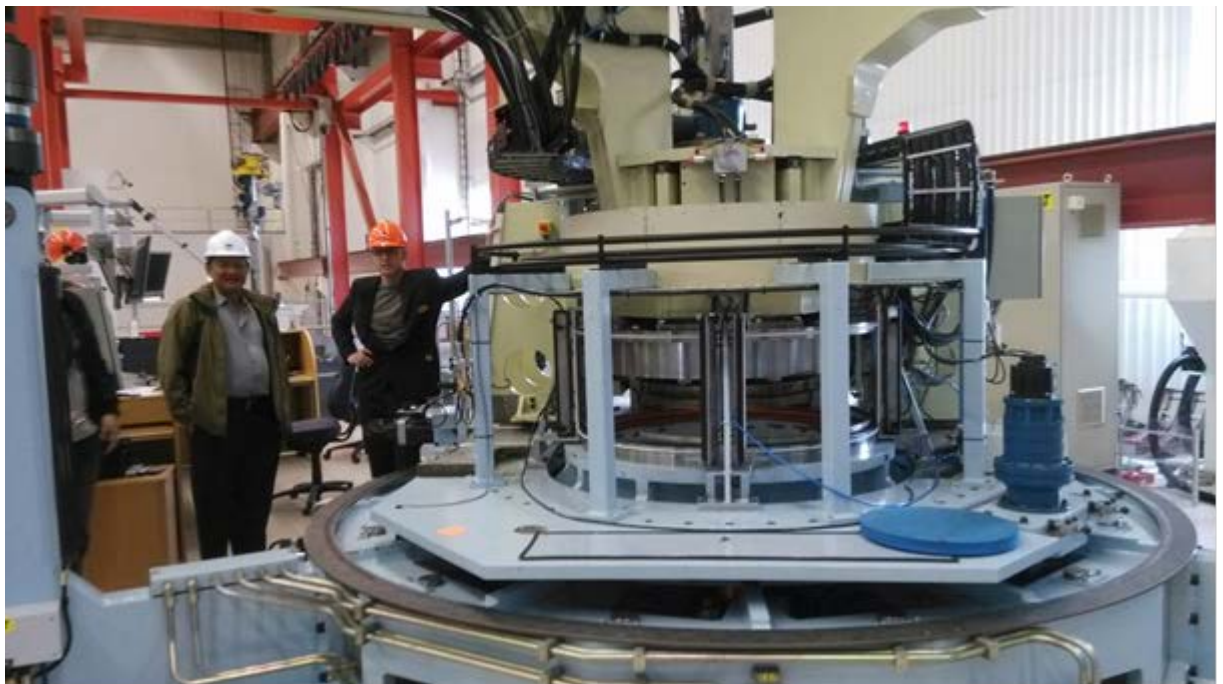


(b) 水平式

圖十 分段抽製製程示意圖



圖十一 廢棄物實驗室設備配置圖



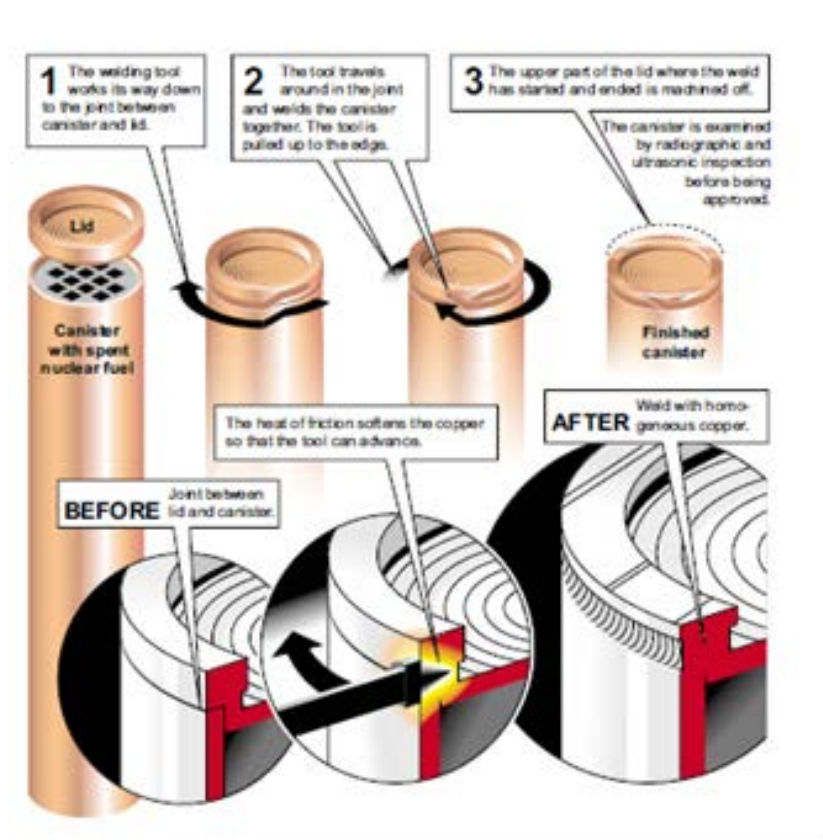
圖十二 螺旋摩擦銲接機圖



圖十三 SKB 設計之摩擦銲接接頭



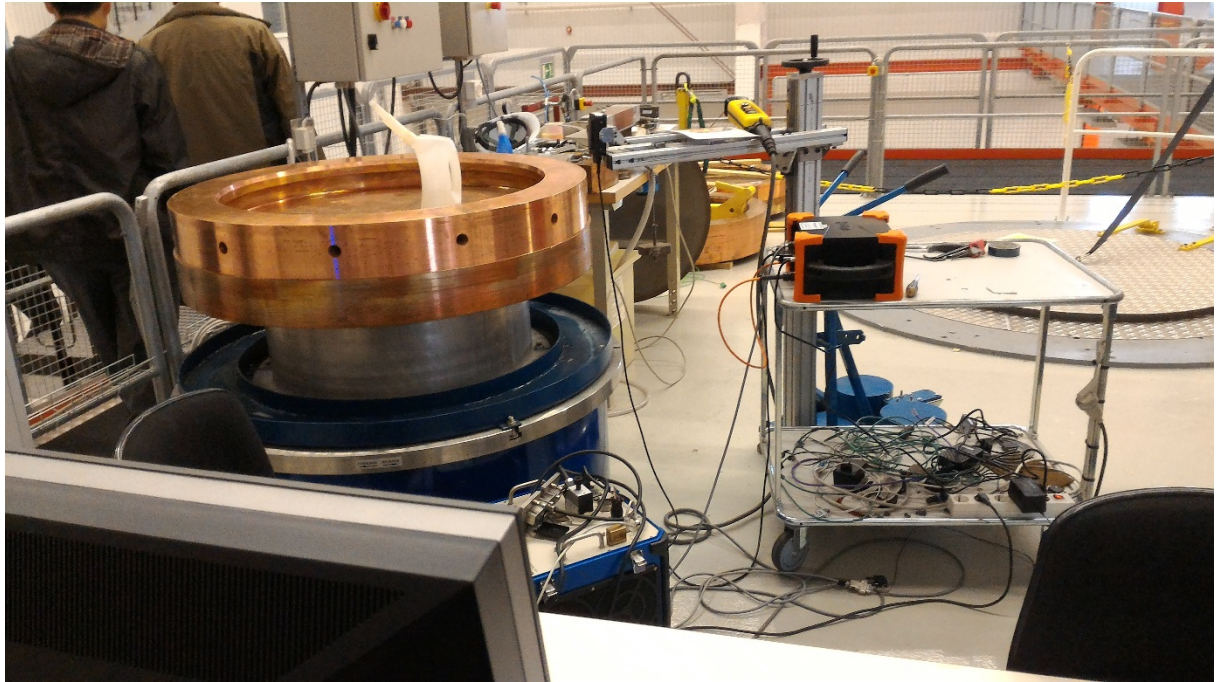
圖十四 銲接後拉力試驗之試片破壞圖



圖十五 螺旋摩擦鐸接示意圖



圖十六 X 光攝影控制機圖



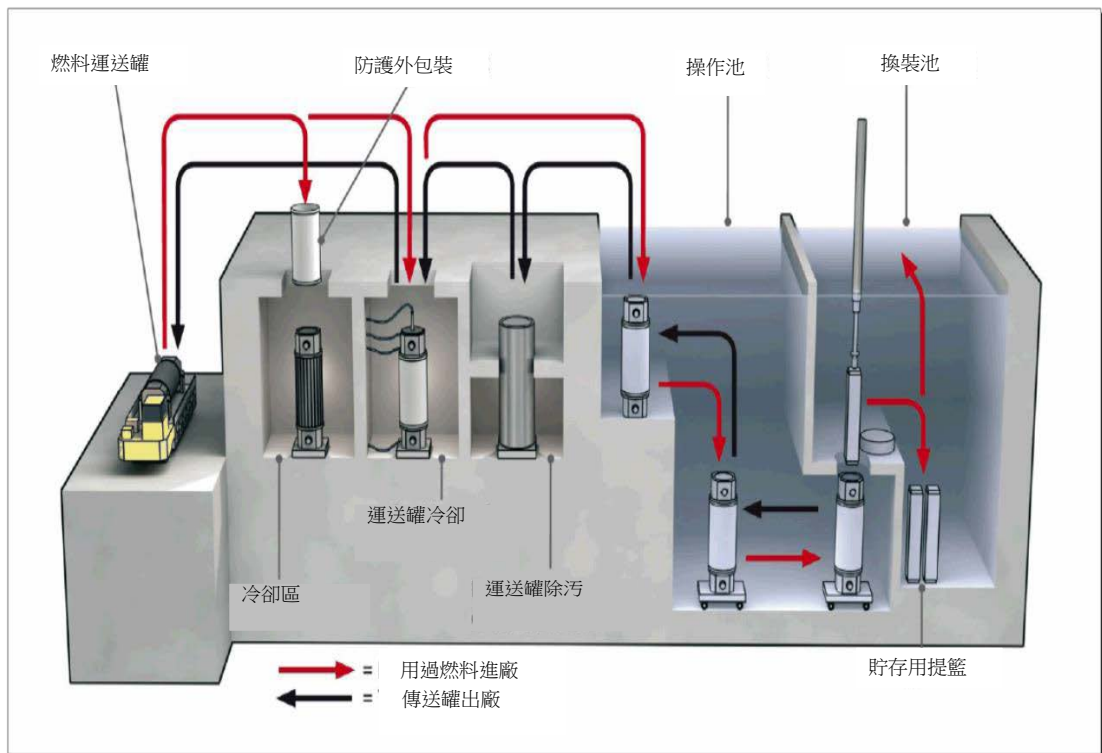
圖十七 超音波檢測設備圖



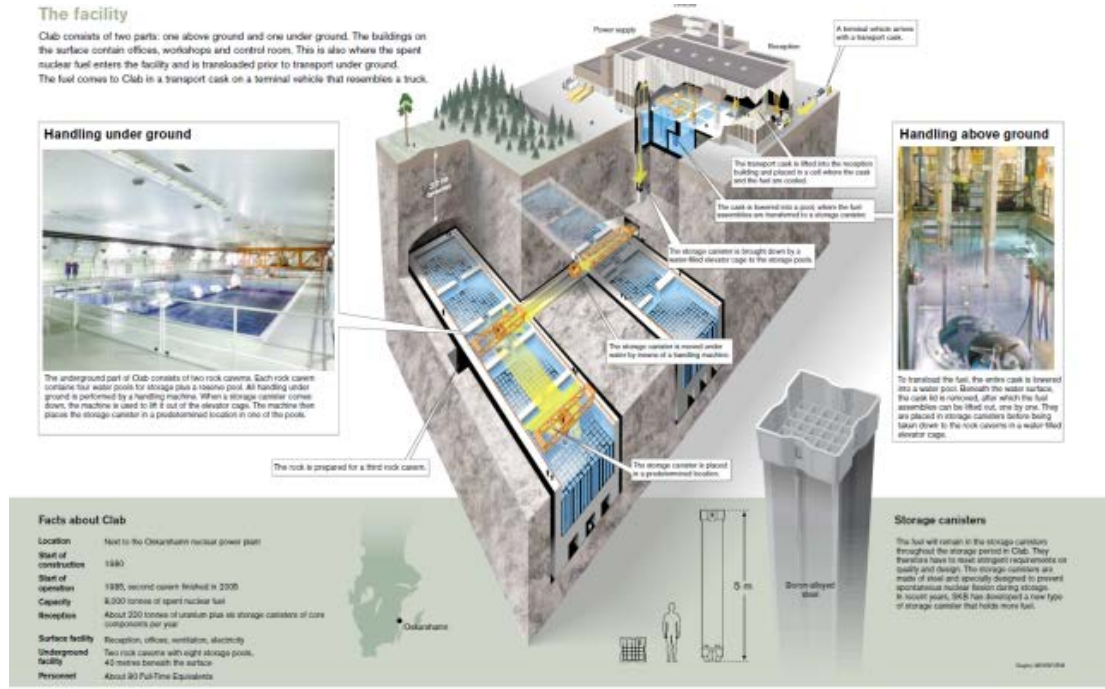
圖十八 廢棄物罐組件測試後展示圖



圖十九 瑞典中期貯存設施 Clab 剖面圖



圖二十 瑞典 Clab 中期貯存設施運作圖



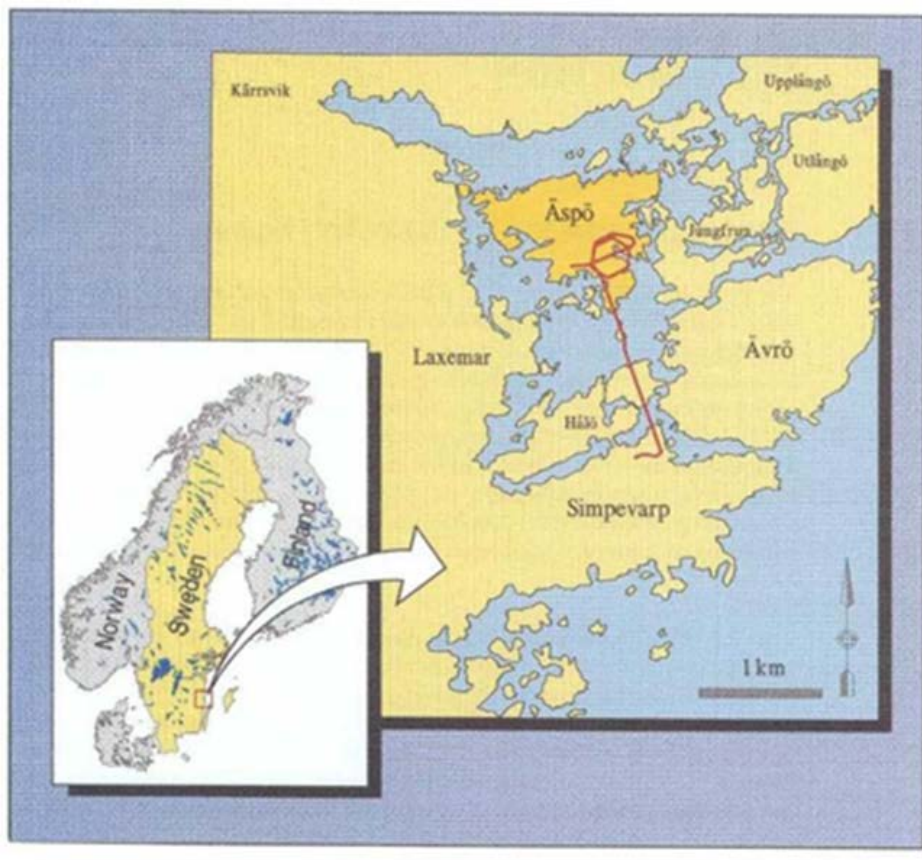
圖二十一 中期貯存廠 Clab 的配置與作業概況圖



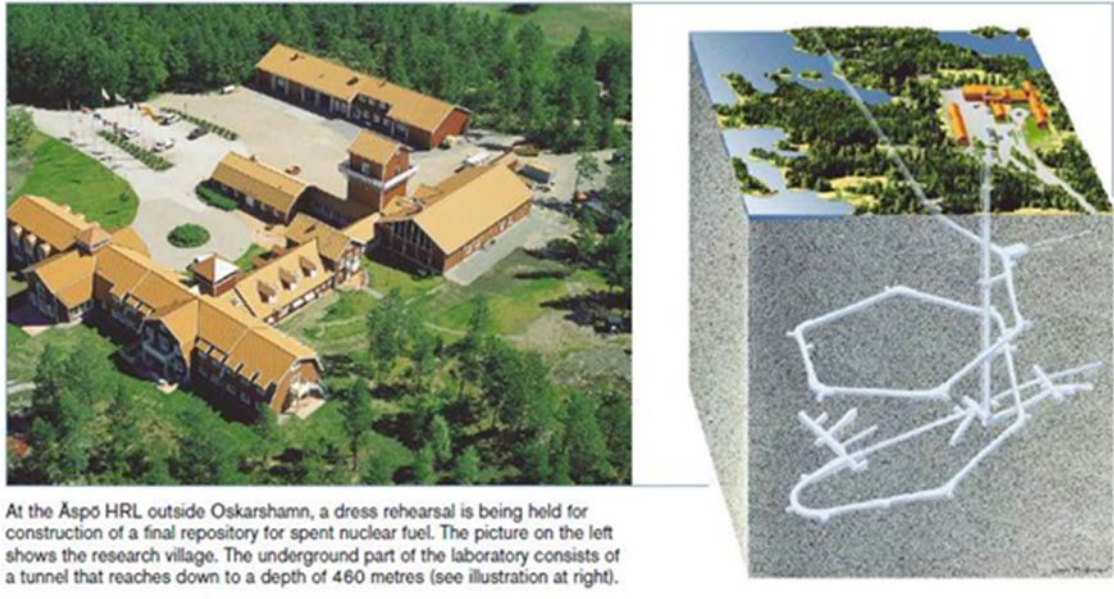
圖二十二 Äspö HRL 接待中心外的歡迎旗幟圖



圖二十三 Äspö HRL 接待中心內服務台上的歡迎旗幟圖



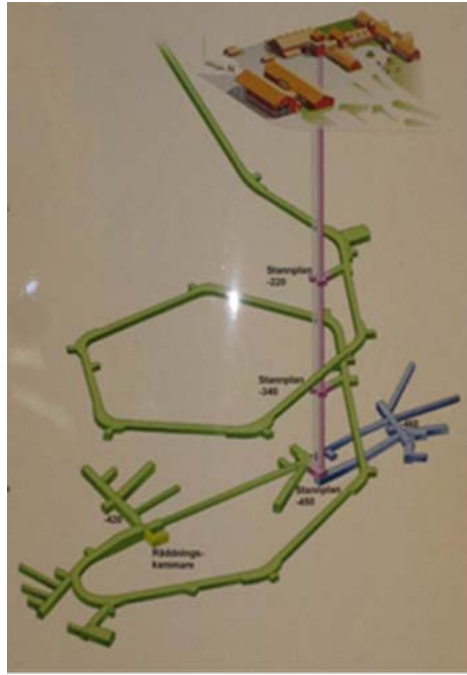
圖二十四 Äspö HRL 地理位置圖



圖二十五 Äspö HRL 坑道與地表設施圖



圖二十六 Äspö HRL 的 TBM 斷面圖

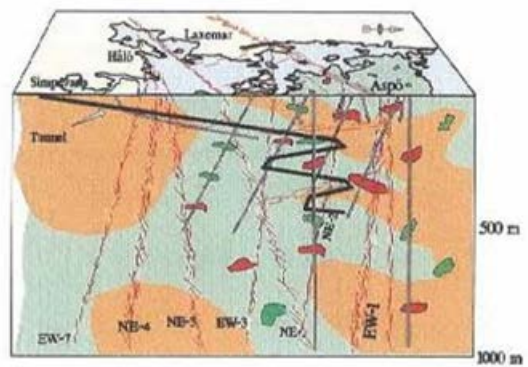


圖二十七 Äspö HRL 示意圖

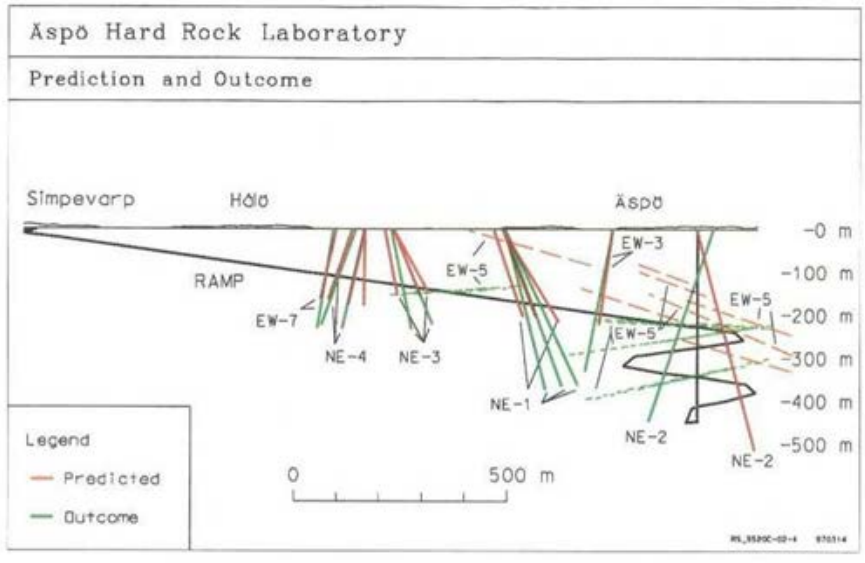


GEOLOGY

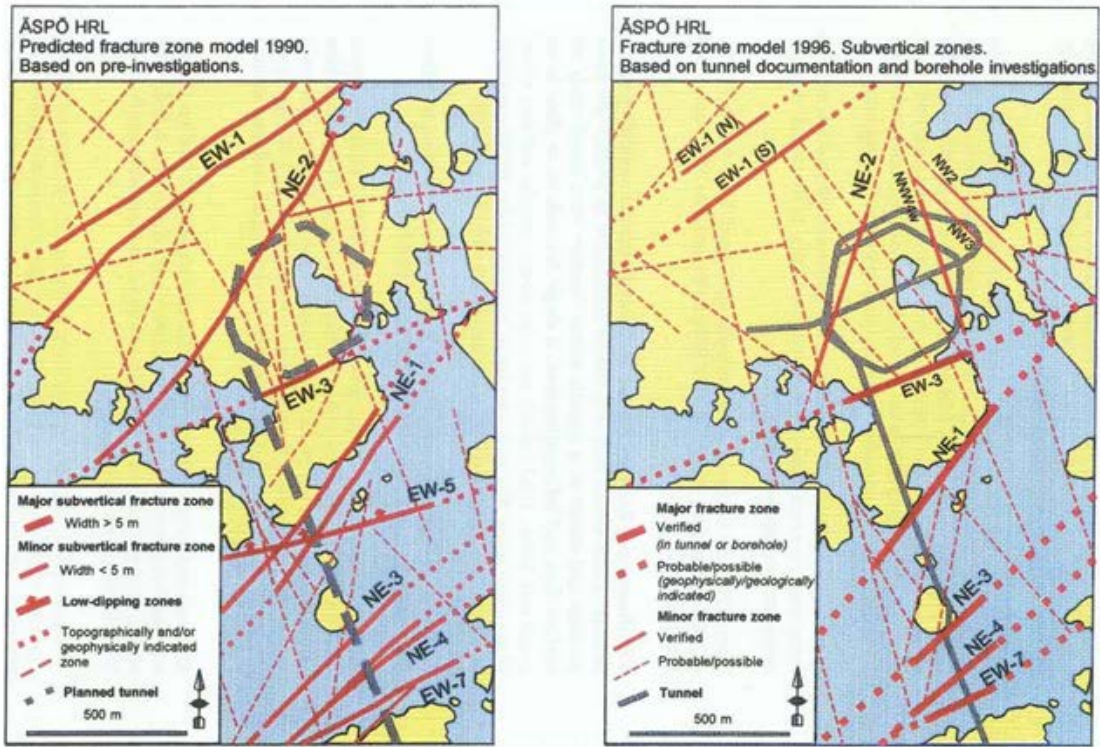
LEGEND	
	Mylonite
	Fine-grained granite
	Sesåland (Ävrö) granite
	Äspö diorite
	Greenschist
	Fracture zone
	Fracture swarm



圖二十八 Äspö 地質概念圖

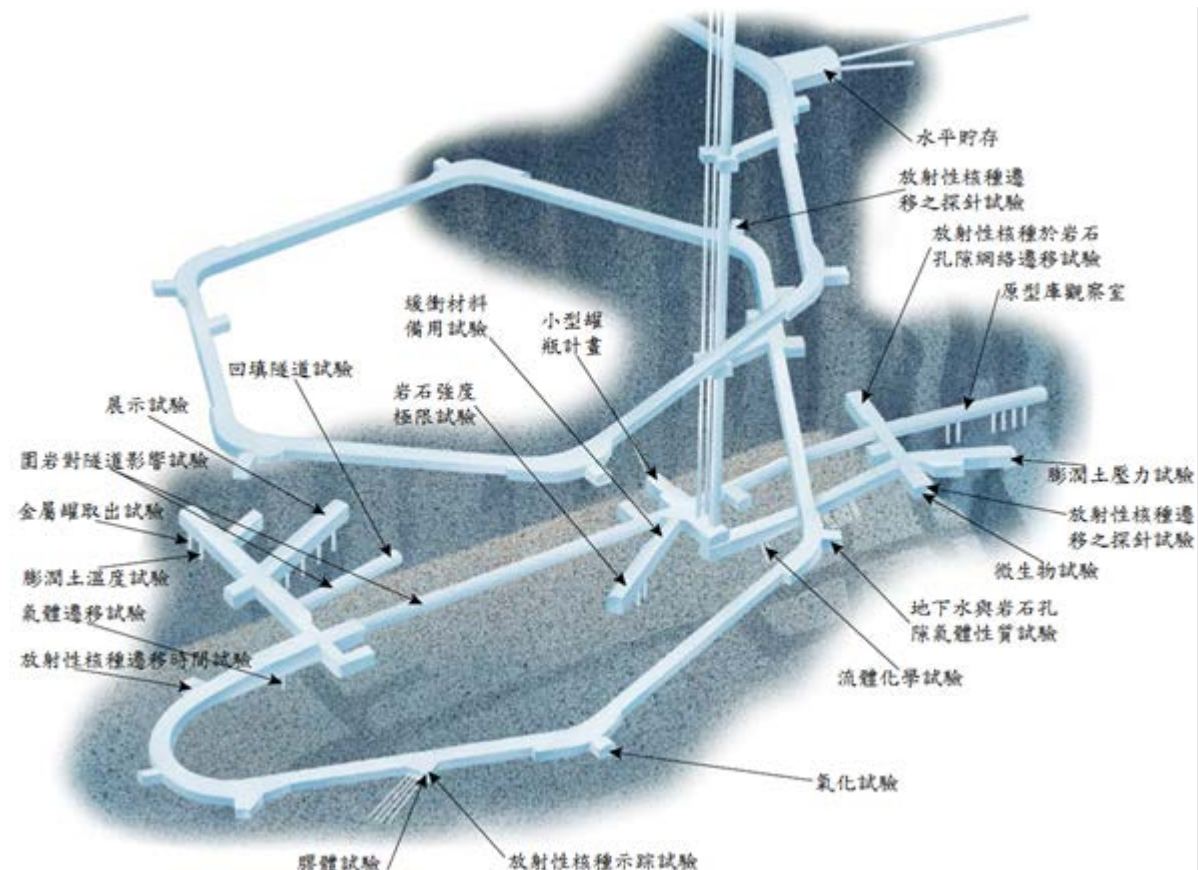


(a) 隧道斷面圖

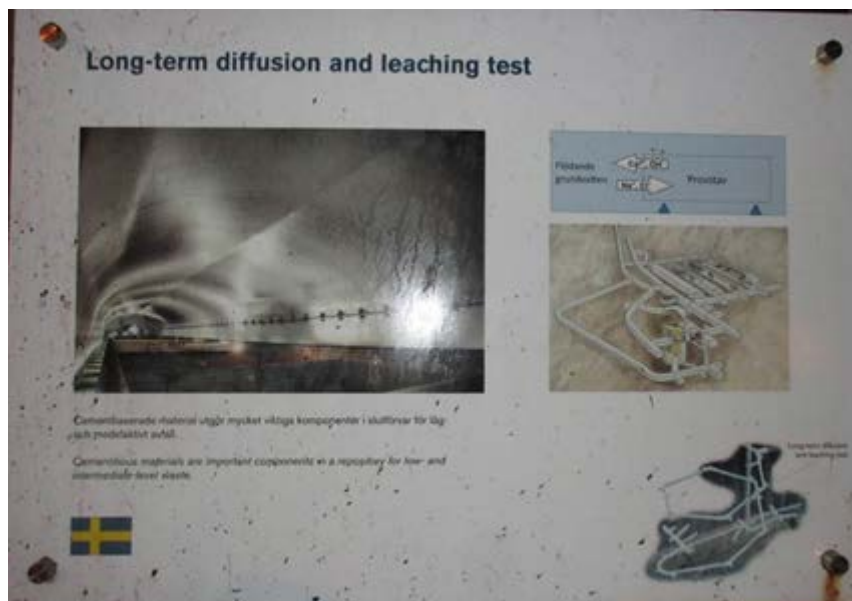


(b) 不連續面分佈圖

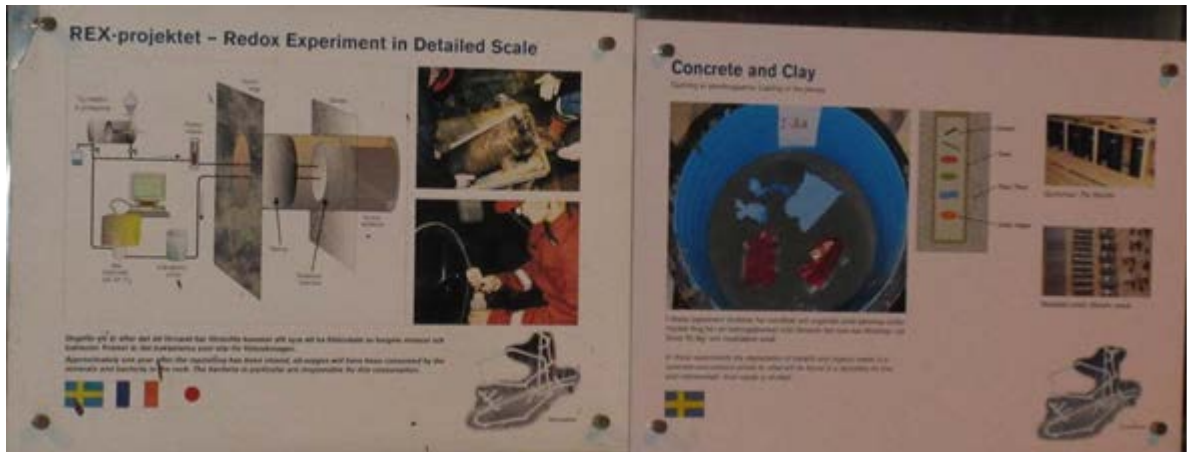
圖二十九 Äspö 地區隧道不連續面分佈比較圖



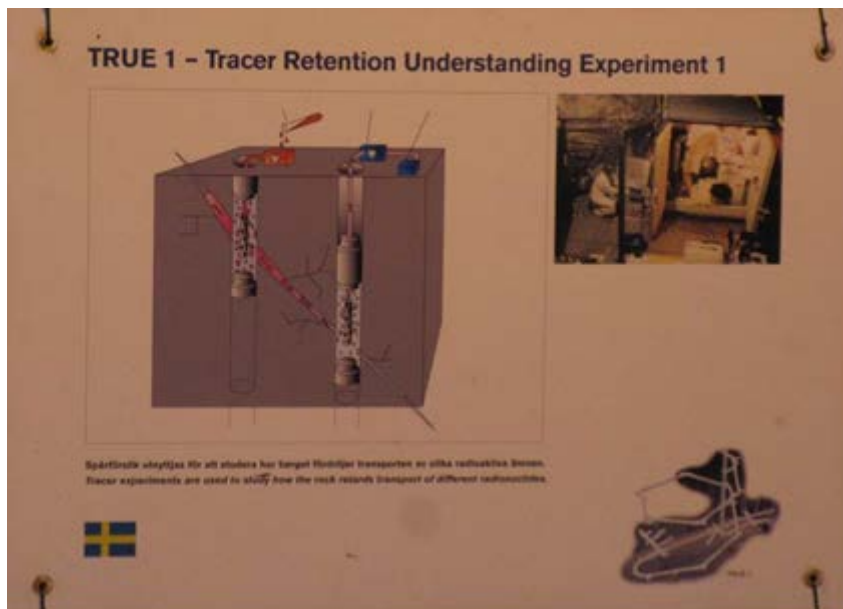
圖三十 Äspö HRL 實驗隧道分佈圖



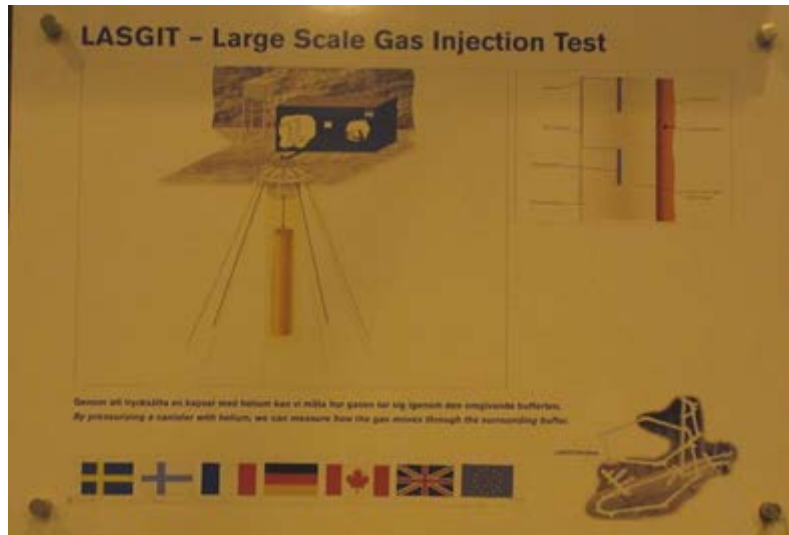
圖三十一 Äspö HRL 長期擴散實驗展示圖



圖三十二 Äspö HRL 氧化還原實驗展示圖



圖三十三 Äspö HRL 示蹤劑延滯實驗展示圖



圖三十四 Äspö HRL 大尺度注氣測試展示圖



圖三十五 Äspö HRL 回填與封塞測試展示圖



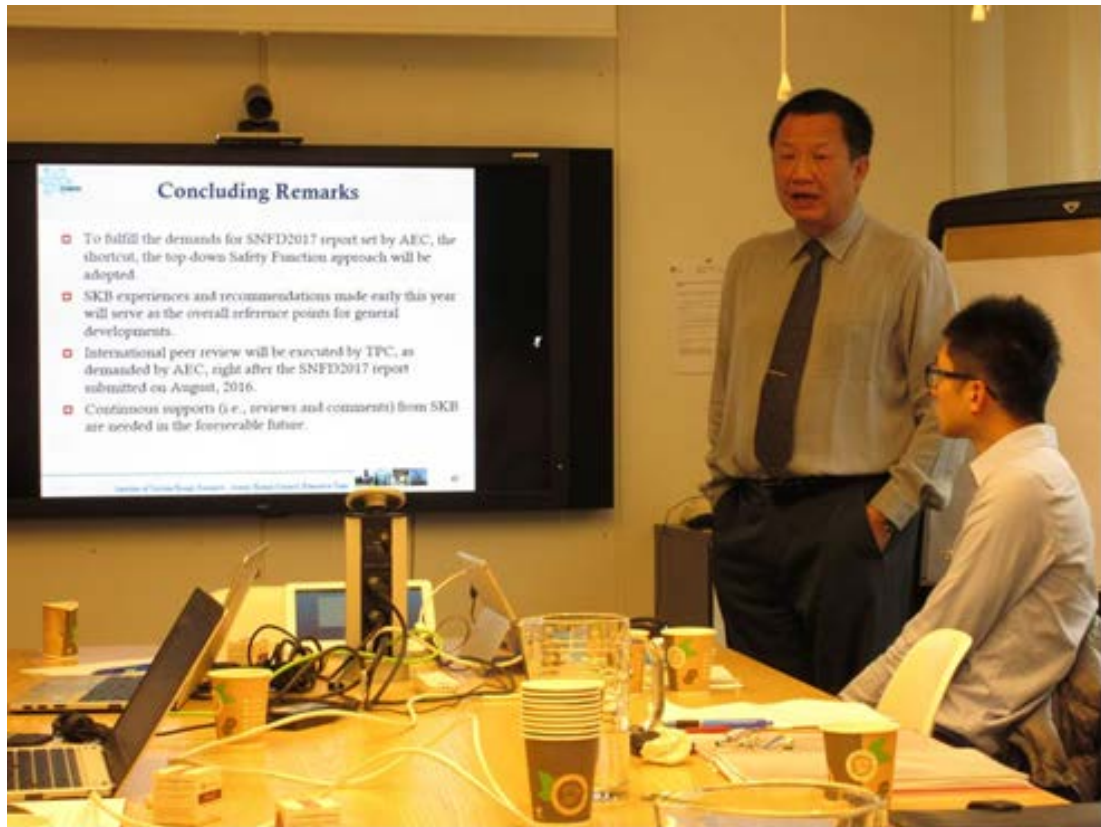
圖三十六 Äspö HRL 全尺度處置孔模型示意圖



圖三十七 Äspö HRL 處置機具(1)圖



圖三十八 Äspö HRL 處置機具(2)圖



圖三十九 核能研究所進行整體計畫的說明圖



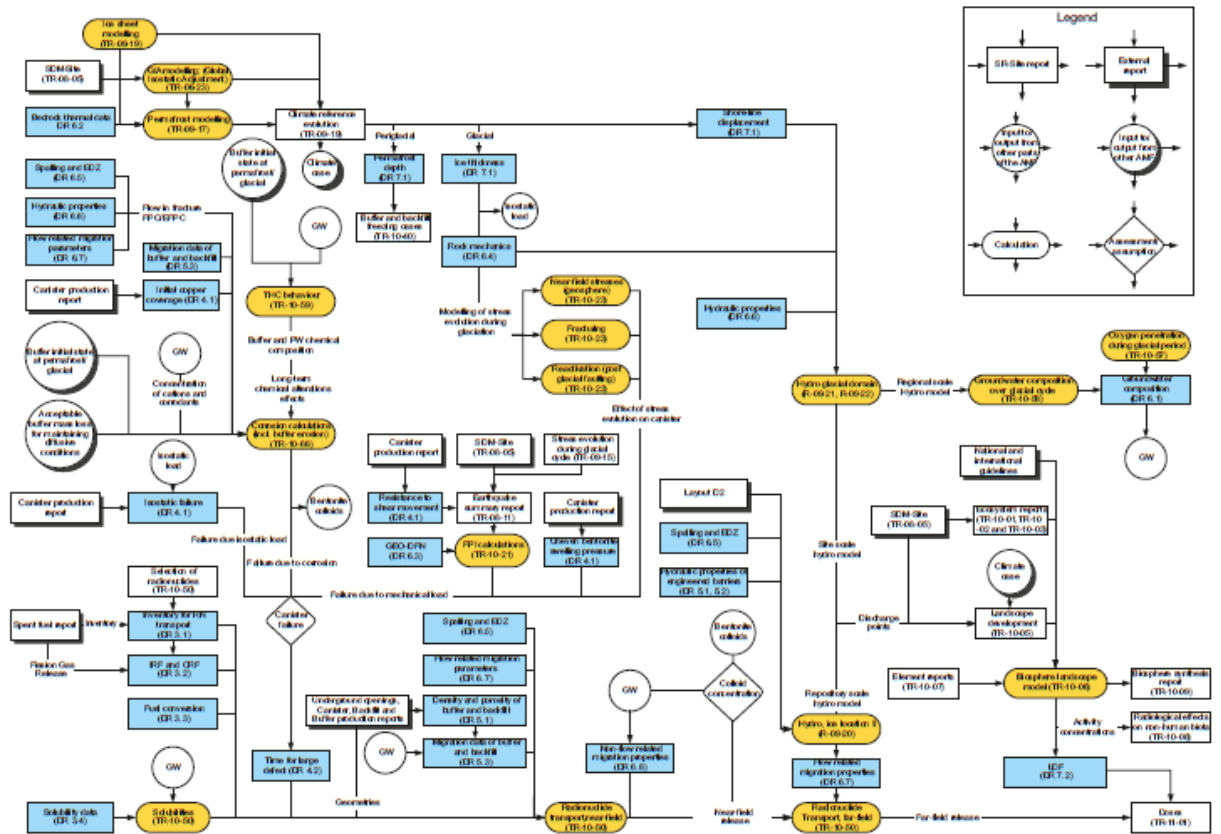
圖四十 與 SKB 專家進行 SA1 說明圖



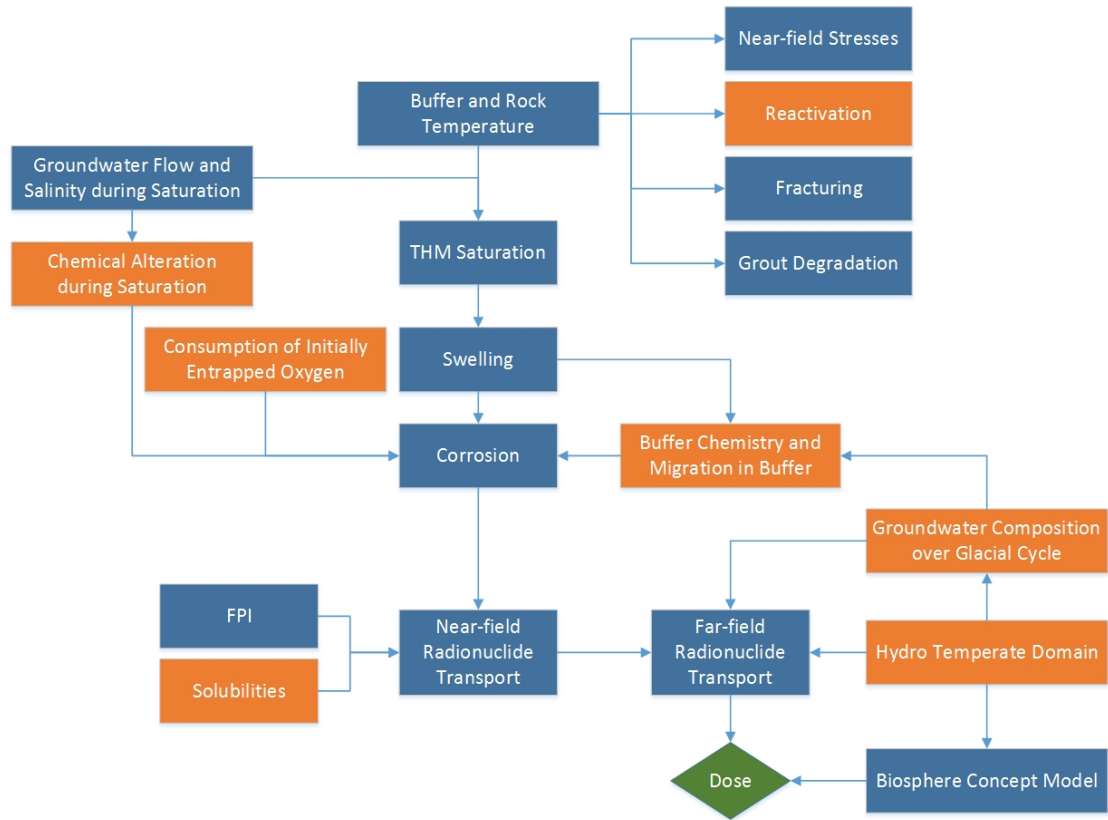
圖四十一 在 SKB 總部討論合作議題



圖四十二 核研所與 Raymond Munier 討論圖



圖四十三 TR-10-51 分析流程圖



圖四十四 初版 SNFD2017 評估模式流程圖

參、心得

本次考察瑞典放射性廢棄物營運設施，瞭解瑞典對於放射性廢棄物的管制理念、規範及營運方式，吸收經驗，深入瞭解用過核子燃料地質處置技術，有助於辦理本處相關業務。就本次考察提出看法及心得如下：

- 一、瑞典於 1972 年開始營運核能電廠，即開始規劃及推動未來核廢料該處置方式，1983 年提出用過核子燃料地質處置技術報告(KBS-3)，1985 年開始營運用過核子燃料中期貯存場(Clab)，1988 年開始營運中、低放射性最終處置場(SFR)，雖然於 1990 年代用過核子燃料最終處置計畫遭遇挫敗，其後記取經驗，於 1995-2009 年進行民眾溝通並取得地方政府支持，2009 年確定用過核子燃料最終處置場場址，2011 年提出建造執照申請，預計 2025 年開始營運。
- 二、在瑞典的經驗中，可以看出處理放射性廢棄物專責機構的存在的確有助於推動處置計畫，擁有較為獨力與靈活的施行措施，同時較易獲得當地民眾的信任。
- 三、在瑞典可以發現他們在與民眾的溝通上盡了相當多的心力，大部分瑞典人都知道 SKB 這家公司，SKB 也進行了相當多的溝通活動如展覽、研討會及設施參訪等等，設施都擁有相當完備的簡報室及免費的咖啡機可以進行溝通，有些設施雖地處偏遠，但擁有遊覽車、公車等可以通行。此外，大部分進行解說的人員都非工程師出身，例如 SFR 的接待 Linda 是教育系背景、Åspö 地下實驗室的 Roland 之前是做導遊的，他們的解說方式淺顯易懂，較親近民眾。
- 四、瑞典放射性廢棄物營運設施都處於核電廠附近，以利基礎設施如道路、碼頭及員工餐廳、宿舍等可以共用，同時可降低建造及營運成本。設施內環境幾乎都保持相當地整潔，隨時隨地都處於可以讓人參訪的情況，可以看出對此的用心。
- 五、瑞典處置技術研究，邀請相當多國家的參與，如處置物罐(Canister)主要

為德國、地下實驗室的研究有日本、瑞士、法國等等參與，不但降低了研究成本，同時也促進了國際交流。

六、瑞典在廢棄物罐實驗室中，陳列展出一根從瓦薩博物館租借的銅製砲管，該砲管係於 1628 年沉沒於斯德哥爾摩海灣，並於 1961 年打撈上岸。SKB 針對該砲管進行腐蝕實驗，作為天然類比的案例之一，不但作為處置概念選擇銅罐的基礎，也作為與民眾溝通的重點。

肆、建議

- 一、瑞典專職機構執行處置計畫時，擁有充足的執行人力，任務涵蓋高低放處置與中期貯存設施之經營及燃料運輸等業務，人力約 500 人。且每三年須修正其研究、開發與示範(RD&D)，就有 5-10 人之間專門負責統合協調各部門修訂期計畫，建議國內高低放處置計畫，也應盡快成立類似的專職機構，擁有較為彈性的人力進用，有助於計畫推動。
- 二、瑞典處置技術研究擁有可參訪的實驗室，如在 Oskarshamn 的 Canister Laboratory 和 Äspö 地下實驗室，不僅僅可以做研究，同時可以讓參訪民眾對處置技術有更為直觀的認識，建議國內建立類似可供參訪之實驗室，有助於處置計畫的推動及與當地民眾溝通。