

出國報告（出國類別：其他）

低放射性廢棄物營運設施觀摩與經驗交流 會議

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：王柏宇 安全評估專員

派赴國家：德國、瑞典

出國期間：105 年 09 月 20 日～105 年 09 月 29 日

報告日期：105 年 10 月 24 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：低放射性廢棄物營運設施觀摩與經驗交流會議

頁數 27 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

陳德隆/台灣電力公司/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

王柏宇/台灣電力公司/核能後端營運處/核能工程師/02-23657210 ext:2329

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：2016/09/20-2016/09/29 出國地區：德國、瑞典

報告日期：2016/10/24

分類號/目

關鍵詞：放射性廢棄物、最終處置

內容摘要：(二百至三百字)

- 一、 赴德國參加由德國 GNS (Gesellschaft für Nuklear-Service mbH)公司主辦之「中、低放最終處置計畫與技術發展」會議，針對核能後端營運、低放貯存暨處置發展、放射性廢棄物盛裝容器技術發展等相關主題進行會議研討與技術參訪。
- 二、 赴瑞典參加瑞典 SKB(Svensk Kärnbränslehantering AB)公司所舉辦之「中、低放最終處置設施建置與營運」會議，針對中低放射性廢棄物最終處置場之營運管理、廢棄物處理、運輸作業、建置計畫、民眾溝通等相關主題進行會議研討與技術參訪。

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

目 次

壹、出國目的.....	1
貳、出國過程.....	2
參、工作內容.....	3
一、 德國「中、低放最終處置計畫與技術發展會議」.....	3
(一) 德國 GNS (Gesellschaft für Nuklear-Service mbH)公司介紹	3
(二) 會議研討議題	4
1. 德國電力供應現況.....	4
2. 德國核能發電現況.....	5
3. 德國放射性廢棄物最終處置計畫發展現況.....	7
4. 技術參訪-GNS 放射性廢棄物容器製造工廠	8
二、 瑞典「中、低放最終處置設施建置與營運會議」.....	10
(一) 瑞典 SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB)公司介紹	10
(二) 會議研討議題	11
1. 瑞典電力供應現況.....	11
2. 瑞典核能發電現況.....	11
3. 瑞典放射性廢棄物最終處置計畫發展現況.....	12
4. 瑞典 SFR (Swedish Final Repository) 擴建計畫.....	18
5. 瑞典 SFR 營運管理經驗.....	21
6. 技術參訪-SFR.....	23
肆、心得及建議.....	27

壹、出國目的

針對「低放射性廢棄物處置計畫」，本公司為進一步強化我國處置場之規劃設計，需借鏡國際上最終處置場之實際營運管理經驗，故參加瑞典 SKB 公司主辦之研討會議，針對 SKB 公司已營運近 30 年之 SFR（Swedish Final Repository）中低放最終處置場，就其建置經驗、營運管理、廢棄物處理、運輸作業、民眾溝通等相關主題進行會議研討與現場參訪。另，有關「放射性廢棄物集中式貯存設施興建計畫」，係本公司配合放射性廢棄物營運中長期規劃，參考各國經驗，規劃將用過核子燃料及核電廠運轉及除役產生之低放射性廢棄物進行集中貯存，作為最終處置前之應變方案。本應變方案中將貯存高、低放射性廢棄物，故參加德國 GNS 公司主辦之研討會議，針對德國使用之低放射性廢棄物容器與用過燃料金屬護箱之技術發展與目前製造、設計、使用情形，併同德國非核家園政策確立後之核能後端營運發展情況等主題，進行會議研討與現場參訪。吸取兩國相關領域之最新知識、技術法規趨勢與實際經驗，藉此強化本公司相關專案之規劃、管理與技術能力。

- 一、 赴德國參加德國 GNS 公司所舉辦之「中、低放最終處置計畫與技術發展會議」，會議主題包括：
 - (1) 非核家園政策施行後之核能後端營運現況與最終處置計畫進展
 - (2) 放射性廢棄物容器技術發展、設計製造、實際使用情況
- 二、 赴瑞典參加瑞典 SKB 公司所舉辦之「中、低放最終處置設施建置與營運會議」，會議主題包括：
 - (一) 放射性廢棄物最終處置計畫發展
 - (二) 中低放最終處置場 SFR 建置、運輸與營運管理經驗
 - (三) 因應電廠除役之 SFR 最終處置場擴建計畫
 - (四) 公眾溝通策略與經驗

貳、出國過程

自 105 年 09 月 20 日出發，迄 09 月 29 日返國（共計 10 天），停留德國及瑞典兩國。詳細行程如下：

日期	地點與行程	工作內容
09 月 20 日（二）~ 09 月 21 日（三）	台北→德國法蘭克福→德國埃森	去程
09 月 22 日（四）	德國埃森	參加德國 GNS 公司舉辦之「中、低放最終處置計畫與技術發展會議」
09 月 23 日（五）	德國埃森→德國杜塞爾多夫	參加德國 GNS 公司舉辦之「中、低放最終處置計畫與技術發展會議」
09 月 24 日（六）	德國杜塞爾多夫→瑞典斯德哥爾摩	路程
09 月 25 日（日）	瑞典斯德哥爾摩	整理資料
09 月 26 日（一）~ 09 月 27 日（二）	瑞典斯德哥爾摩	參加瑞典 SKB 公司舉辦之「中、低放最終處置設施建置與營運」
09 月 28 日（三）~ 09 月 29 日（四）	瑞典斯德哥爾摩→台北	返程

參、工作內容

一、 德國「中、低放最終處置計畫與技術發展會議」

本次會議係由德國 GNS 公司主辦，會議流程係由雙方先就會議主題分別進行簡報，簡報完畢後進行討論與交流。本次會議工作內容，分為「德國 GNS 公司介紹」與「會議研討議題」。

(一) 德國 GNS 公司介紹

德國 GNS(Gesellschaft für Nuklear-Service mbH, GNS)公司成立於 1974 年，總部位於德國杜塞爾多夫旁的埃森，由德國 4 家擁有核能發電的電力公司出資組立(如圖 1)，營業額約為 3 億歐元，職員 670 人，具有 40 年核電廠及各種放射性廢棄物處理與最終處置計畫相關經驗。GNS 擁有 5 個子公司，其中 DBE 負責德國低放射性廢棄物最終處置場(KONRAD)興建營運等相關工作，目前為 GNS 及德國政府共同持股，未來隨著 KONRAD 計畫發展，GNS 將逐步把 DBE 經營權全部轉移給德國政府，使其成為國營企業。

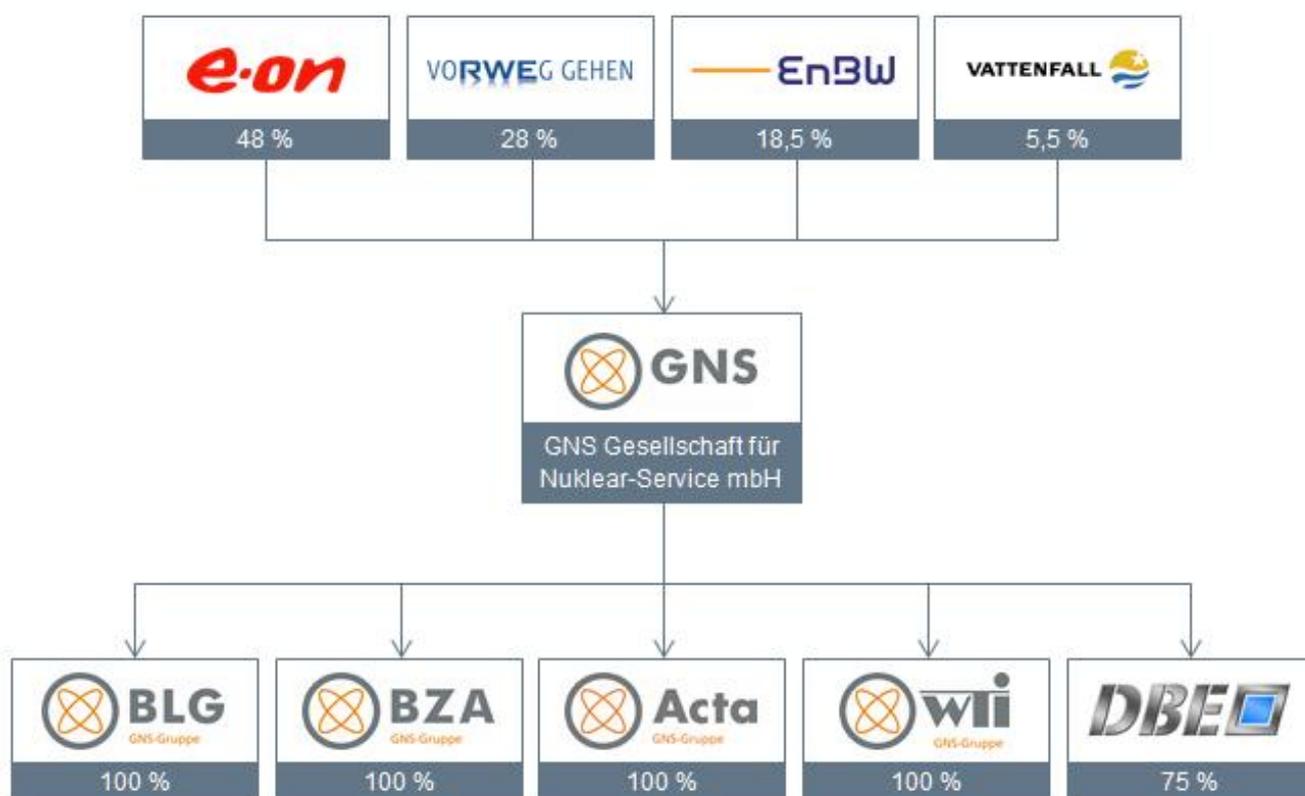


圖 1：德國 GNS 公司集團結構

(資料來源：<http://www.gns.de/language=en/24428/shareholder-and-subsiaries>)

(二) 會議研討議題

1. 德國電力供應現況

統計至 2016 年 7 月為止，德國總發電量為 3,022 億度，發電量結構如圖 2 所示，我國 2015 年度年發電量結構列於圖 2 左側，用以參酌比較。

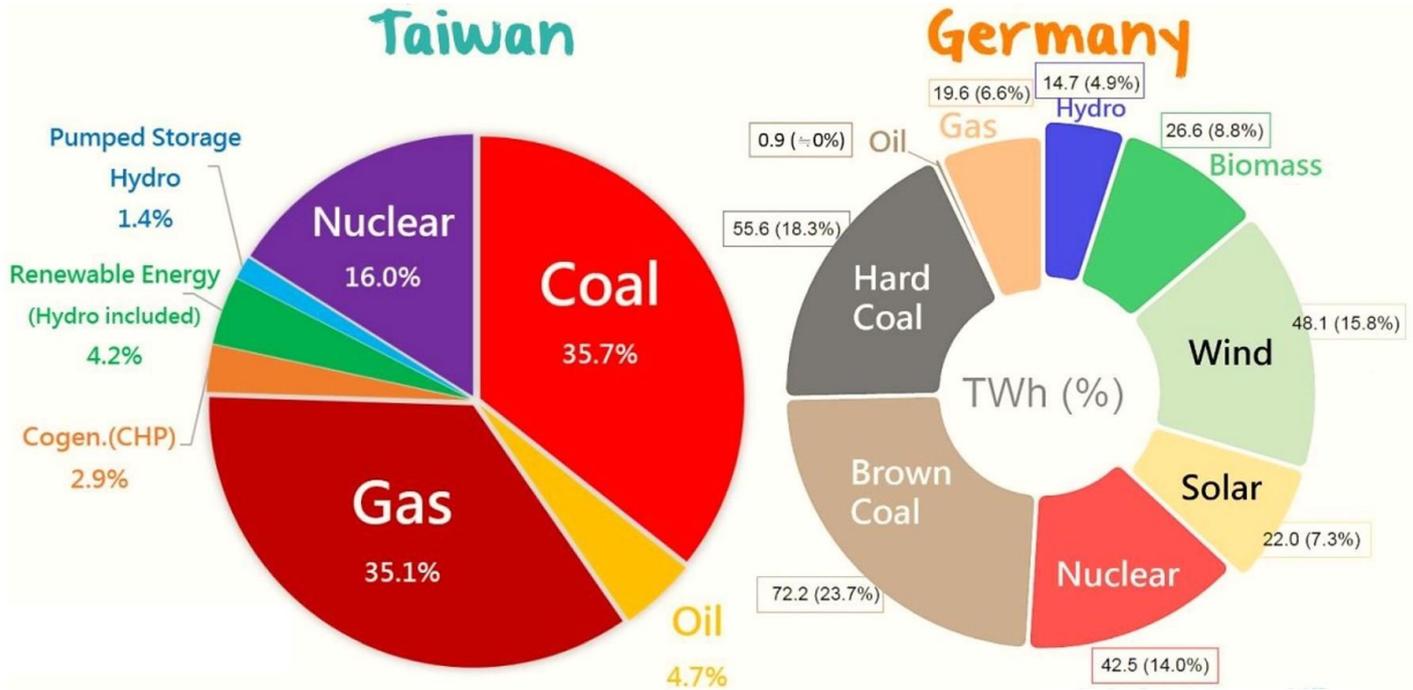


圖 2：台灣、德國發電量結構圖

(資料來源：Fraunhofer Institute for Solar Energy System, ISE)

德國發電量約為我國 2.5 倍，其中褐煤(Brown Coal)、白煤(Hard Coal)、柴油、天然氣加總之火電發電量占比最高，達總發電量的 48.6%，其次為風力發電，占總發電量 15.8%，第三名為核能發電，占總發電量 14.0%，後依序為生質能(8.8%)、太陽能(7.3%)以及水力發電(4.9%)。圖 3 整理夏季(2016 年 6 月)、冬季(2016 年 1 月)時德國單月各類發電方式之發電量負載變化，右側圖例「尖載」旁的數字為發電量最大佔比與最小佔比，「基載」旁數字則為平均佔比。

由圖 2 可看出，現階段德國主要仍是仰賴火力發電做為主要電力來源，而其近年來大力發展的風力與太陽能總發電量占比近四分之一，高出我國許多。進一步分析其負載變化，基載為褐煤、核能、生質能與水力，尖載則主要為太陽能、風力、天然氣與白煤。依照不同季節的氣候特性，夏季日照時數長達約 16 小時，尖載係以太陽能發電為主，其他尖載如風力、天然氣、白煤則配合太陽能發電狀況做調節；冬季日照時間縮短至約 8 小時，基載發電量占比增加，太陽能發電量驟降，尖載改以風力為主，

最高發電量佔比可達 30%，然風力發電不穩定的特性，須依靠天然氣發電彌補，於用電量尖峰且無風力時，天然氣發電量佔比可高達 18%，遠高於夏季的 4%。

另，根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA)最新資料，2014 年度德國民生用電每度電價格約為新台幣 12 元，約為我國的 4.2 倍。

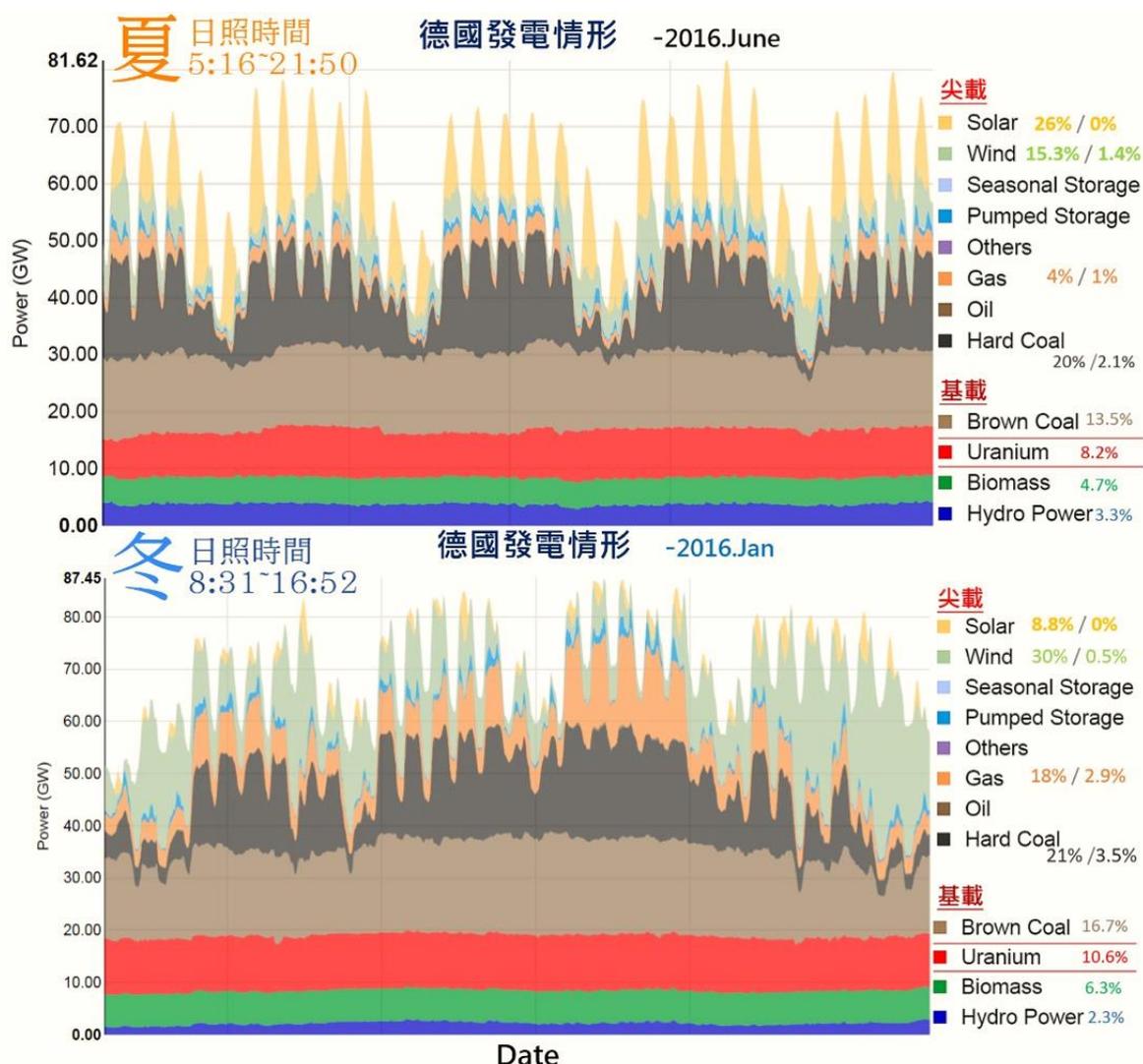


圖 3：德國夏季、冬季發電量負載變化

(資料來源：Fraunhofer Institute for Solar Energy System, ISE)

2. 德國核能發電現況

自德國政府於 2011 年宣布計畫於 2022 年前關閉所有核能發電機組之非核家園政策(Nuclear Phase-out)後，當時運轉中的 17 座機組迄今已有 9 座已停機關閉，目前僅 8 座機組運轉中，總裝置容量減為 10.8 GWe，約為我國 2.1 倍，這 8 座核能機組分佈位置如圖 4 紫框所示，各機組資訊如表 1 所示。



圖 4：德國運轉中核能發電機組位置圖

表 1:德國運轉中核能發電機組資訊

Reactor	Location	Type	Capacity (MWe)	Operational	Scheduled Date for shut down
KKE	Emsland	PWR	1290	1988–present	Dec. 31, 2022
GKN Unit 2	Neckarwestheim	PWR	1269	1989–present	Dec. 31, 2022
KKI Isar Unit 2	Essenbach	PWR	1365	1988–present	Dec. 31, 2022
KWG	Grohnde	PWR	1360	1985–present	Dec. 31, 2021
KBR	Brokdorf	PWR	1326	1986–present	Dec. 31, 2021
KKP Unit 2	Philippsburg	PWR	1358	1985–present	Dec. 31, 2019
KRB Unit B	Gundremmingen	BWR	1284	1984–present	Dec. 31, 2017
KRB Unit C	Gundremmingen	BWR	1288	1985–present	Dec. 31, 2021

3. 德國放射性廢棄物最終處置計畫發展現況

德國放射性廢棄物來源主要為核能發電、學術研究、醫藥工業等，而德國政府將放射性廢棄物分為兩類：「具熱源(heat-generating)廢棄物」及「近無熱源(negligible heat-generating)廢棄物」。「具熱源廢棄物」包含用過核子燃料與用過核子燃料再處理所產生之分裂產物(fission product)，性質近似我國高放射性廢棄物；「近無熱源(廢棄物)」則為「具熱源廢棄物」以外的放射性廢棄物，性質近似我國低放射性廢棄物。

德國目前規劃將其所產的放射性廢棄物於德國境內進行最終處置，針對「具熱源廢棄物」及「近無熱源廢棄物」最終處置計畫發展情形，分述如下：

針對「具熱源廢棄物」，德國政府於 1979 年選定德國北部的 Gorleben 作為「具熱源廢棄物」的最終處置預定地，該區主要岩層為鹽岩，自 1979 年起陸續進行了數項場址特性調查研究計畫。然當初 Gorleben 的選址程序並無相關法規依據，因此德國「具熱源廢棄物」的最終處置選址法規於近年完成立法，並於 2013 年正式生效後，Gorleben 區域的最終處置相關計畫隨即終止，後續德國政府將依照選址法規執行選址程序，預計將於 2031 年完成選址，2050 年開始運轉「具熱源廢棄物」的最終處置場。

針對「近無熱源廢棄物」，針對此類廢棄物，德國過去曾有 2 座礦坑改建的處置設施，Asse II 與 Morsleben。Asse II 為鹽岩，1967 年啟用，1978 年停止接收廢棄物，目前由德國政府管理，共有約 47,000m³ 廢棄物貯存於場內，因 Asse II 持續開挖鄰近鹽礦損害到岩體，導致地下水嚴重入滲，德國政府規畫將 Asse II 內所存廢棄物全數取出後再進行設施除役，相關計畫將由政府主導。Morsleben 同為鹽岩，1971 年啟用，1998 年停止接收廢棄物，目前由德國政府管理，預計將以回填方式將該設施永久封閉。除了前述處置設施外，德國政府也持續調查尋找其他適合進行處置的場址，並於近年決定建置新的 KONRAD 最終處置設施。KONRAD 原本為鐵礦場，短期開採後便即停止，因此岩體仍保持其完整性。KONRAD 區域自 1976 年起便被視為潛在場址開始進行相關的場址特性研究調查工作，後於 2007 年獲得德國聯邦行政法院核發之最終處置場建造暨營運執照，為德國首座依據核能法規申請並獲得執照的處置場。該執照核准之處置容量為 303,000m³，後續建置作業目前正由前述 DBE 公司辦理中。圖 5 為 KONRAD 的坑道式處置場設計概念圖，預訂處置深度達 800 公尺，其中 400 公尺是作為天然障壁的黏土岩。

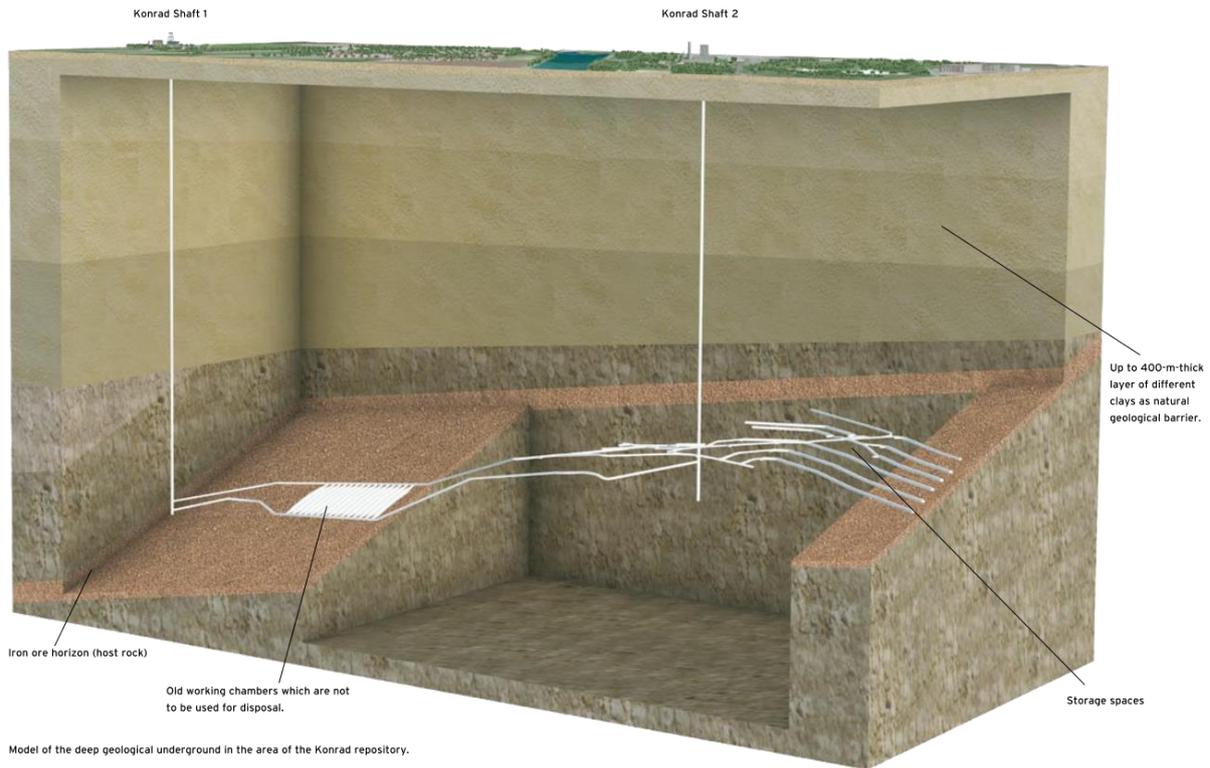


圖 5：德國 KONRAD 處置場設計概念

4. 技術參訪-GNS 放射性廢棄物容器製造工廠

本次會議第二天為技術參訪行程，由 GNS 公司 Dr. Linus Bettermann、Mr. Dirk Becher 帶領參訪 GNS 公司之放射性廢棄物容器製造工廠，如圖 6 所示，參觀其用過核子燃料金屬護箱之製作，以下為參訪內容：

本次參訪為 GNS 研發的 CASTOR®護箱，其係以延性鑄鐵澆置鑄造，為確保金屬材料性質的一致性，整個澆置過程須於 90 秒內完成，完成後其箱體厚度為 40cm，並採雙重密封上蓋及金屬密封環之設計。在完成初步澆鑄後重量約為 160 噸，送至工廠進行目視檢查、超音波檢查等非破壞性檢查，以確保其完整性。經確認無重大瑕疵後，將護箱內、外表面打磨，接著鑽孔填塞中子屏蔽及安裝吊耳軸，後續尚有塗裝、零件組裝等工序，製作程序極為嚴謹。

技術參訪完畢後，於工廠內會議室進行討論與交流，重點摘要如下：

- (1) GNS 公司之用過燃料金屬護箱 CASTOR®具備下列數項特性：
 - (i) 運輸時不需要外加運輸護箱，因為 GNS 金屬護箱本身兼具運輸與貯存功能，只需加裝 Shock Absorber。
 - (ii) 輻射屏蔽之安全功能由護箱本身提供，但場界輻射安全則需借助設施水泥

牆協助。

(iii) CASTOR®設計可存放 19 束 PWR 燃料或 52 束 BWR 燃料，然此設計規格係用於貯存燃耗值約 65 GWd/tU 的高燃耗用過燃料，若用於燃耗較低者，以核二乾貯一期燃耗上限為 35 GWd/tU 為例，CASTOR®可配合需求改變設計，存放不同數量之用過燃料束。

(iv) 目前 CASTOR®已取得美國 10 CFR 71 的使用執照。

(v) CASTOR®一體成型的設計，因無焊接自然沒有焊道缺陷的問題，於安全分析時表現良好。

(vi) 截至 2016 年 3 月為止，已經有超過 1,350 個 GNS 公司的護箱被裝載或貯放於貯存設施，如下表：

國家	數量	國家	數量
德國	1,064	比利時	7
拉托尼亞	118	保加利亞	6
捷克	109	南非	4
瑞士	8		

(vii) GNS 公司新產品「Quiver」，用來裝載受損的用過核子燃料。Quiver 可以設計成存放燃料束或燃料棒，相關的自動封銲、裝填等設備均已開發完成。

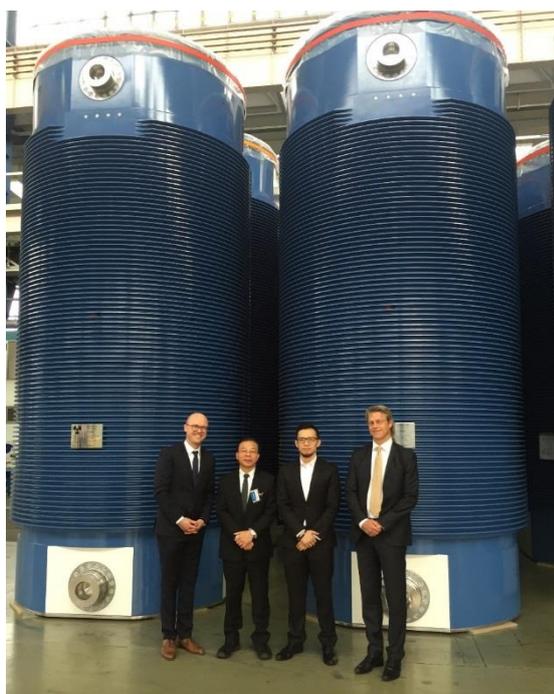


圖 6:技術參訪現場合照(左 1: Dr. Linus Bettermann 右 1: Mr. Dirk Becher)

二、 瑞典「中、低放最終處置設施建置與營運會議」

本次會議係由瑞典 SKB 公司主辦，會議流程係由雙方先就會議主題分別進行簡報，簡報完畢後進行討論與交流。本次會議工作內容，分為「瑞典 SKB 公司介紹」與「會議研討議題」。

(一) 瑞典 SKB 公司介紹

瑞典國會於 1977 年通過「放射性廢棄物法(Waste Act)」，要求瑞典境內擁有核能發電的電力公司須針對其核能發電所產放射性廢棄物的處理、貯存、最終處置進行整體規劃並據以執行。因此，瑞典 4 家擁有核能發電的電力公司於 1978 年合資(如圖 7)成立「瑞典核燃料暨核廢棄物營運公司(Svensk Kärnbränslehantering AB, SKB)」，專責推動瑞典核能發電所產放射性廢棄物之處理、貯存與最終處置等計畫，如圖 8 所示。

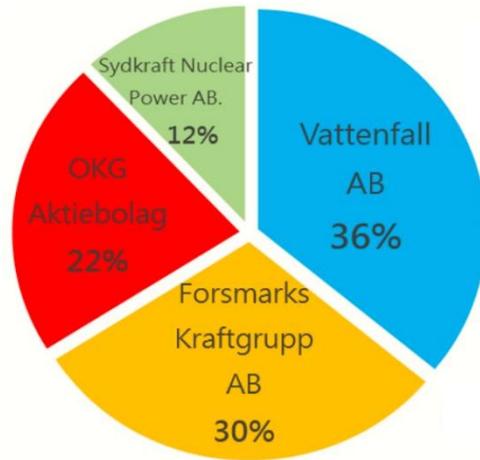


圖 7: 出資成立 SKB 之公司與出資比例

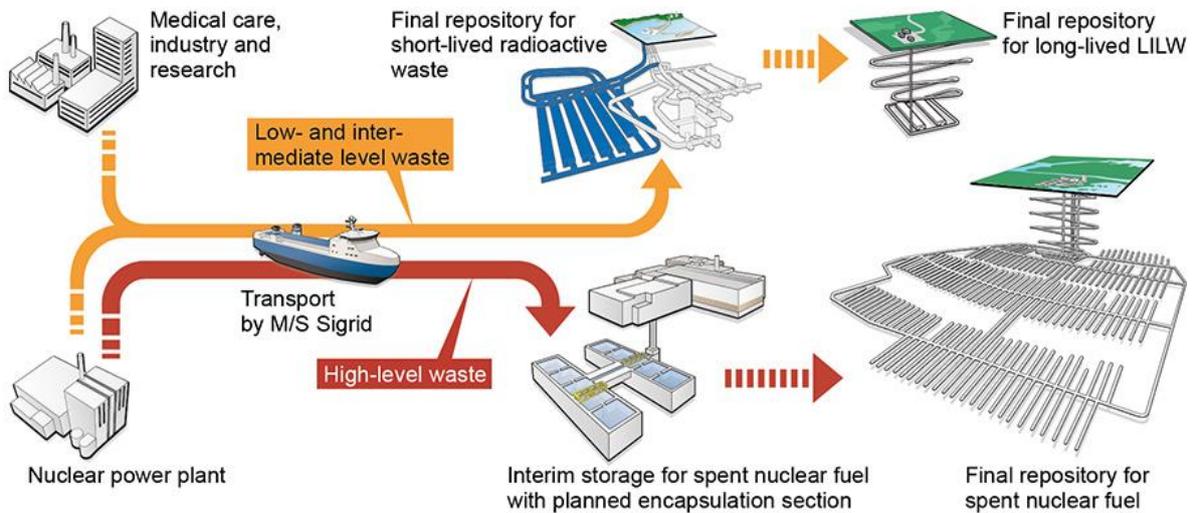


圖 8: SKB 職掌

(二) 會議研討議題

1. 瑞典電力供應現況

統計至 2016 年 5 月為止，瑞典目前總發電量為 761 億度，發電量結構如圖 9 所示，我國 2015 年度年發電量結構列於圖 9 左側，用以參酌比較。

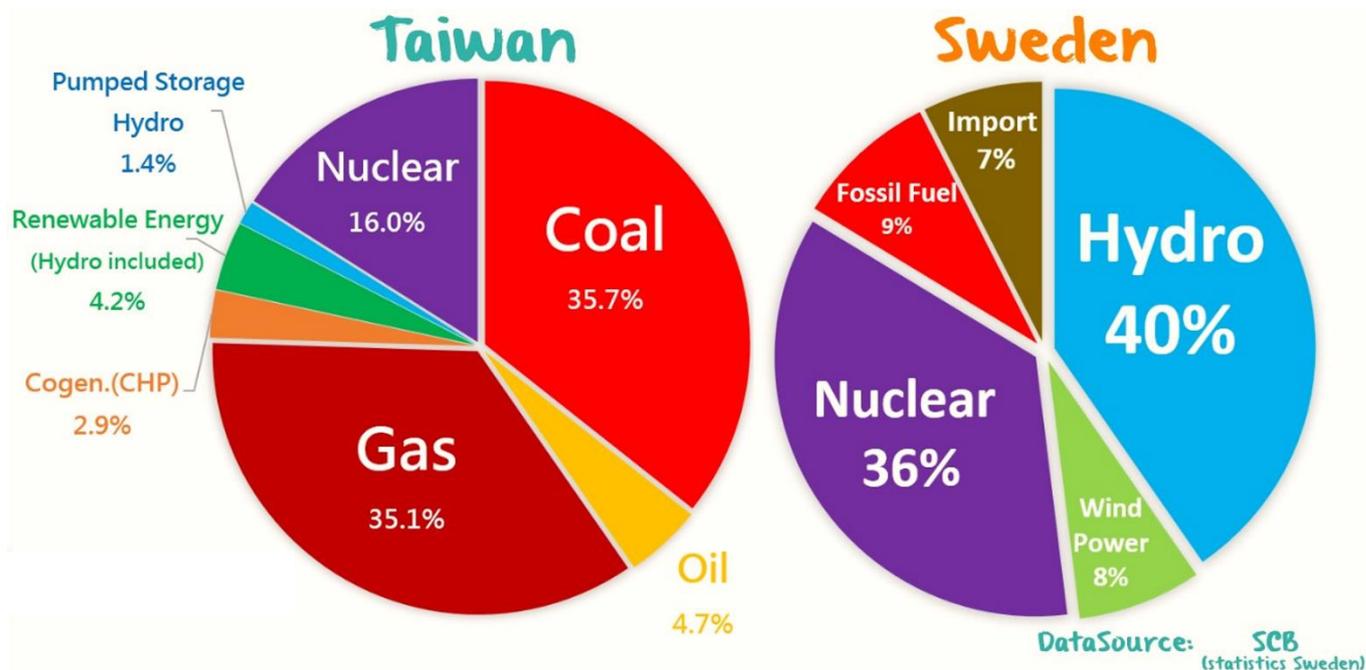


圖 9：台灣、瑞典發電量結構圖

(資料來源：Statistics Sweden, SCB)

瑞典發電量約為我國 85%，其中水力發電量占比最高，達總發電量的 40%。因瑞典位於高緯度區域，日照時數短暫，故其再生能源發展著重於水力與風力，加計風力發電後瑞典再生能源占總發電量 48%，發電度數則約為我國再生能源的 9.6 倍，實為一再生能源高度發展國家。再生能源之後依序為核能發電，占總發電量 36%，以及火力發電(9%)、進口電力(7%)

另，根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA)最新資料，2014 年度瑞典民生用電每度電價格約為新台幣 6.5 元，約為我國的 2.3 倍。

2. 瑞典核能發電現況

瑞典目前有 3 座核電廠，共 10 座機組運轉中，總裝置容量為 9.65 GWe，約為我國 1.9 倍，這 10 座核能機組分佈位置與詳細資訊如圖 10 所示。其中位於南邊的 Barsebäck 電廠 2 部 BWR 機組相繼於 1999 年與 2005 年停止運轉，目前相關除役工作皆已完成準備，待瑞典中低放最終處置場 SFR(Swedish Final Repository)擴建完成，用以容納除役廢棄物的處置坑道開始接收廢棄物後便會開始 Barsebäck 電廠拆除作業。

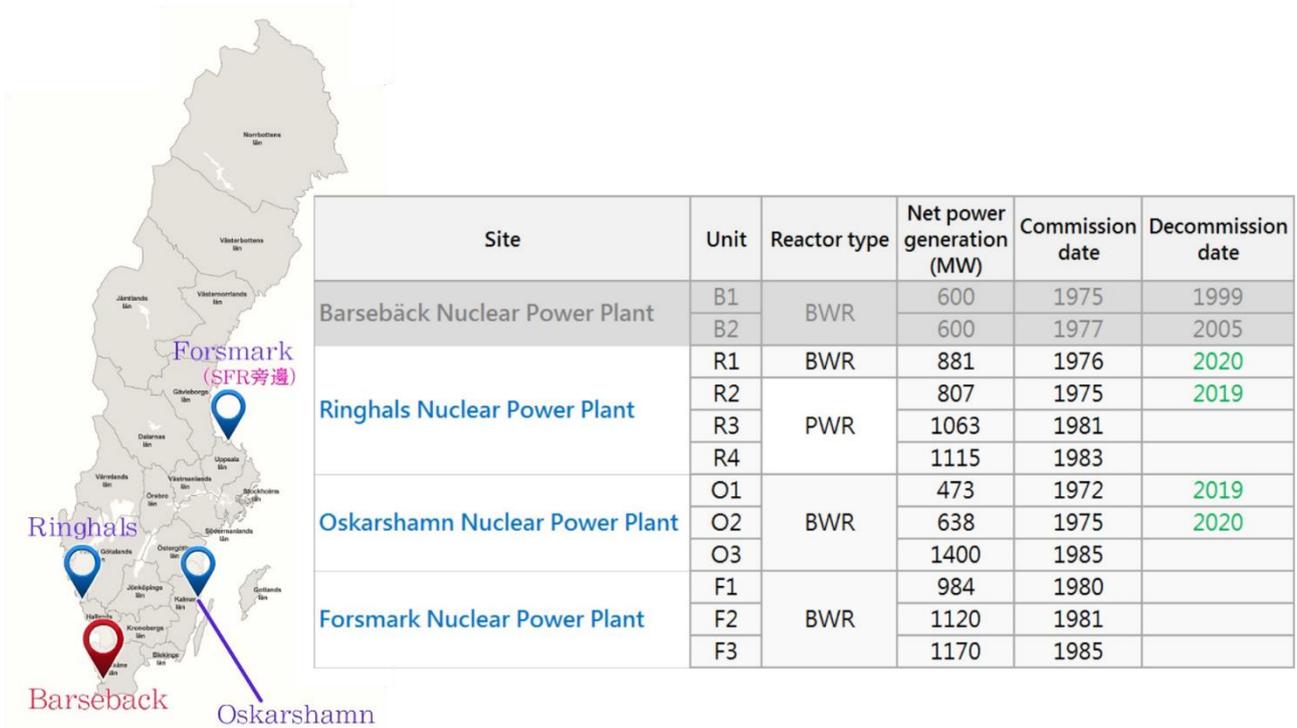


圖 10：瑞典運轉中核能發電機組資訊

3. 瑞典放射性廢棄物最終處置計畫發展現況

瑞典將放射性廢棄物依照國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA) 定義分為四類，其分類、來源、處置方式整理於表 2，並於本節逐一介紹。

表 2:瑞典核能後端營運分類

放射性廢棄物分類	來源	處置方式
VLLW (very low level waste)	<ul style="list-style-type: none"> 電廠運轉產生 電廠除役產生 燃料組裝產生 	<ul style="list-style-type: none"> 除汙後無限制使用 除汙後於當地市政府垃圾掩埋場處置(當作一般廢棄物) 電廠內之淺地層掩埋場處置
LILW -短半衰期 (low & intermediate level waste)	<ul style="list-style-type: none"> 電廠運轉產生 電廠除役產生 廢棄密封射源 學術研究產生 	送至此類廢棄物之處置場- SFR (營運中) 進行最終處置
LILW -長半衰期 (low & intermediate level waste)	<ul style="list-style-type: none"> 反應器內部組件 TRU-waste 高活度密封射源 	送至此類廢棄物之處置場- SFL (規劃中) 進行最終處置
用過核燃料	電廠運轉產生	送至用過核燃料處置場- SFK (規劃中) 進行最終處置

(1) 極低放射性廢棄物(VLLW):此類廢棄物於完成除污工作後，可做為一般廢棄物處理。以 2004 年為例，瑞典境內就有近 600 噸此類廢棄物完成除污後送至公營垃圾掩埋場處理。除了掩埋處理外，屬於 VLLW 的金屬廢棄物也可於除污完成後，回收並重新熔製成容器等設備於核能設施使用。除了上述處理方法，目前運轉中的核電廠廠內皆有針對此類廢棄物所建的淺地層掩埋場，相關資訊整理如表 3 所示。

表 3:瑞典運轉中電廠之 VLLW 淺地層掩埋場

核電廠	設計容量(m ³) (換算55加侖桶數)	總活度上限 / α核種活度上限 (GBq)	剩餘容量(m ³) (換算55加侖桶數) 統計至2010.12.31
Forsmark	17,000 (85,000桶)	200 / 0.2	11,769 (58,000桶)
Oskarshamn	10,000 (50,000桶)	200 / 0.2	2,654 (13,000桶)
Ringhals	10,000 (50,000桶)	1,100 / 0.1	4,058 (20,000桶)

(2) 長半衰期-中、低放射性廢棄物(Long-Lived LILW):此類廢棄物定義為放射性無法於 500 年內衰變到背景值的廢棄物，其最終處置場計畫名稱為 SFL，SKB 規劃將 SFL 建置於 Forsmark 區域內，處置深度 300 公尺，並與 SFR 連接。SFL 計畫時程如圖 11 所示，此類廢棄物相對其他類廢棄物而言數量較少，現階段仍處於起步階段，SKB 規劃於用過燃料最終處置場 SFK 與 SFR 擴建的建造執照申請完成並開始動工後，才會將重點轉回發展 SFL 計畫，預計於 2045 年開始運轉。



圖 11：瑞典長半衰期中低放最終處置場 SFL 計畫時程

(3) 用過核燃料(Spent Fuel):用過核燃料最終處置場計畫名稱為 SFK，SKB 規劃 SFK 建置於 Forsmark 區域內，其處置設計為將用過燃料束置於銅罐內存放於深度 500 公尺的處置坑道後以膨潤土材料回填，地表設施則有銅罐工廠與封裝工廠，全案預算達 370 億瑞典克朗(約新台幣 1,400 億)，SFK 場址位置、處置概念等資訊如圖 12、圖 13 所示。



圖 12：瑞典用過核燃料最終處置場 SFK 場址(虛線處)與全案預算

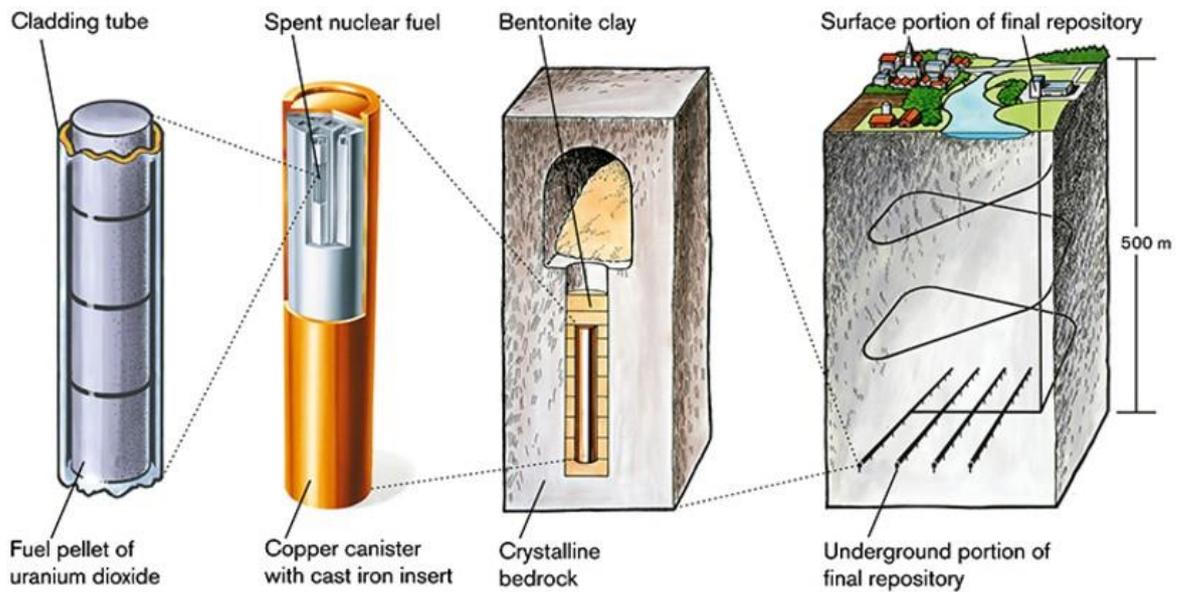


圖 13：瑞典用過核燃料最終處置概念

SKB 已於 2011 年 3 月提送在 Forsmark 建置 SFK 的執照申請，該申請須經瑞典核能主管機關、當地政府、環保機關審查，且針對 SFK 關閉後的長期安全分析部分，瑞典政府另外要求須有獨立國外專家審查，這部分的審查工作係由經濟合作暨發展組織 (Organization for Economic Co-operation and Development, OECD) 所屬的核能署 (Nuclear Energy Agency, NEA) 負責，因此整體審查工作需時較長，SKB 預計於 2020 年取得執照並

開始動工興建 SFK，並預計於 2029 年開始運轉 SFK，其完工示意圖如圖 14 所示。



圖 14：SFK 完工示意圖

(4) 短半衰期中、低放射性廢棄物(Short-Lived LILW):定義為放射性可於 500 年內衰變到背景值的廢棄物，其最終處置設施為 SFR。SKB 營運之 SFR 為世界上第一座建於海床下之坑道式最終處置場，用於處置瑞典境內短半衰期中、低放射性廢棄物，自 1988 年開始營運，迄今已有 28 年運轉經驗，位於海床下 60 公尺，總處置容量約 60,000m³，每年接收約 600m³ 的廢棄物，營運人員約 30 位，每年營運費用約 4,000 萬瑞典克朗(約新台幣 1.5 億)。

目前 SFR 的地下設施由 4 條長約 160 公尺的坑道(2 條 BTF、BLA、BMA)和 1 個深約 50 公尺的筒倉(silo)組成，彼此以隧道相連，如圖 15 所示，坑道與筒倉介紹詳述如下:

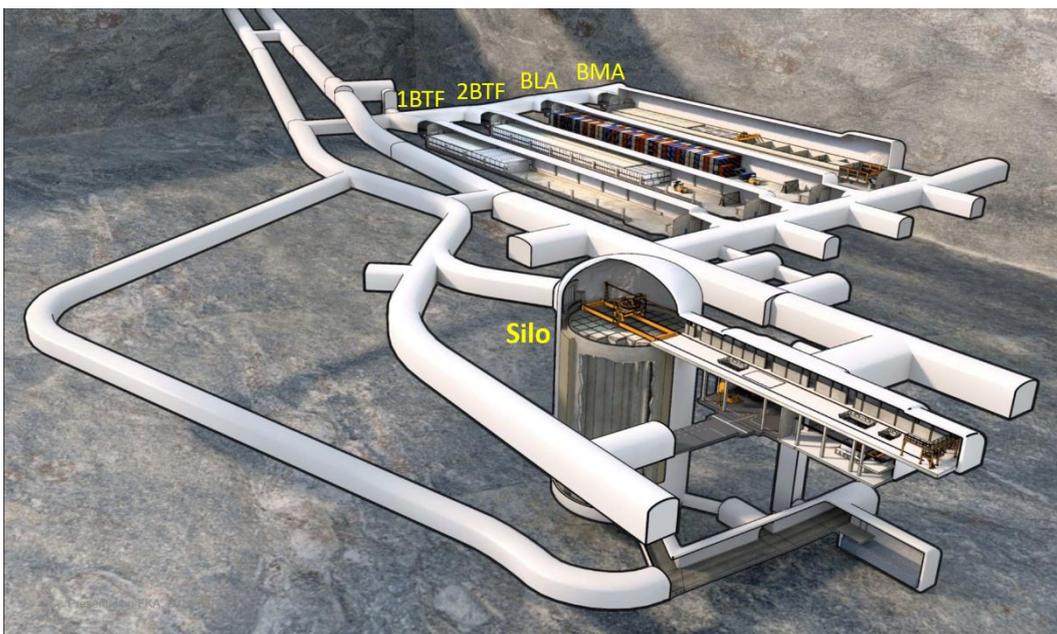


圖 15：SFR 地下設施

(i) **BTF 坑道**:有 2 條 BTF，分為 1BTF 和 2BTF。BTF 寬 14.8 公尺，高 9.5 公尺，坑道工材為混凝土，處置的廢棄物表面劑量率上限為 10 毫西弗/小時，總處置容量約 15,310m³。1BTF 處置盛裝減容處理所產灰燼的 55 加侖桶以及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。混凝土櫃體積為 10 m³，沿著坑道側牆堆置以強化坑道結構穩定度。坑道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。因 BTF 所處置的廢棄物表面劑量率較低，故廢棄物皆以工作人員操作堆高機進行搬運。1BTF 與 2BTF 設計與現場照片如圖 16、圖 17 所示。

灰燼-55加侖鋼桶

離子交換樹脂:
脫水-混凝土櫃
水泥固化-混凝土模組

其他類(ex: 廢金屬)

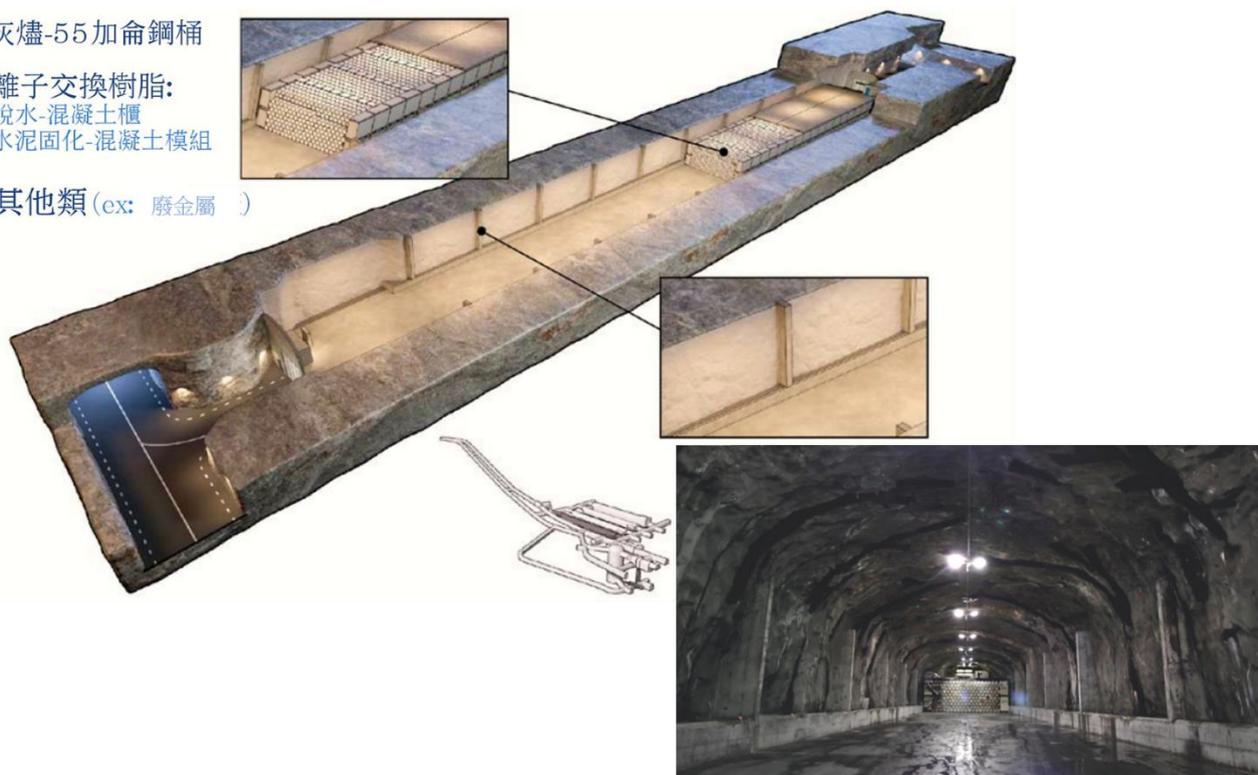


圖 16: 1BTF 坑道設計與現場實景

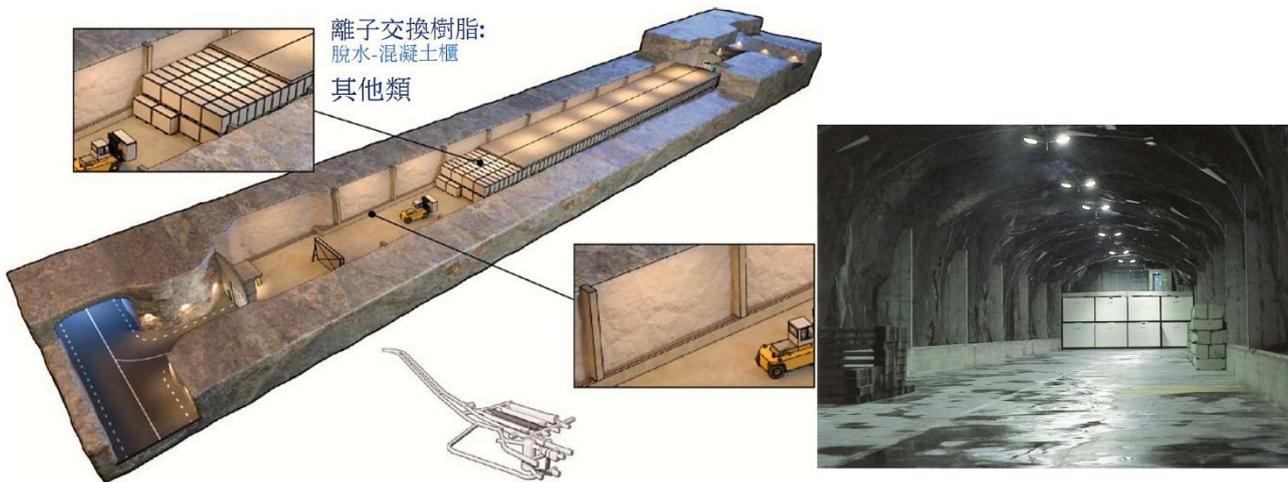


圖 17: 2BTF 坑道設計與現場實景

(ii) **BLA 坑道:** BLA 寬 15 公尺，高 13 公尺，坑道工材為混凝土，處置的廢棄物表面劑量率上限為 2 毫西弗/小時，處置容量約 14,280m³。BLA 處置污染較輕微的放射性廢棄物，如低污染廢金屬、木材、紡織品、紙、塑膠與電纜等，經處理後置入 20 呎 ISO 標準全高貨櫃或半高貨櫃內，再送入 BLA 進行最終處置。BLA 所處置的廢棄物表面劑量率較低，廢棄物係以工作人員操作堆高機進行搬運。BLA 設計與現場照片如圖 18 所示。

低污染短半衰期廢棄物
廢金屬、木材、紡織品、塑膠電纜

其他類

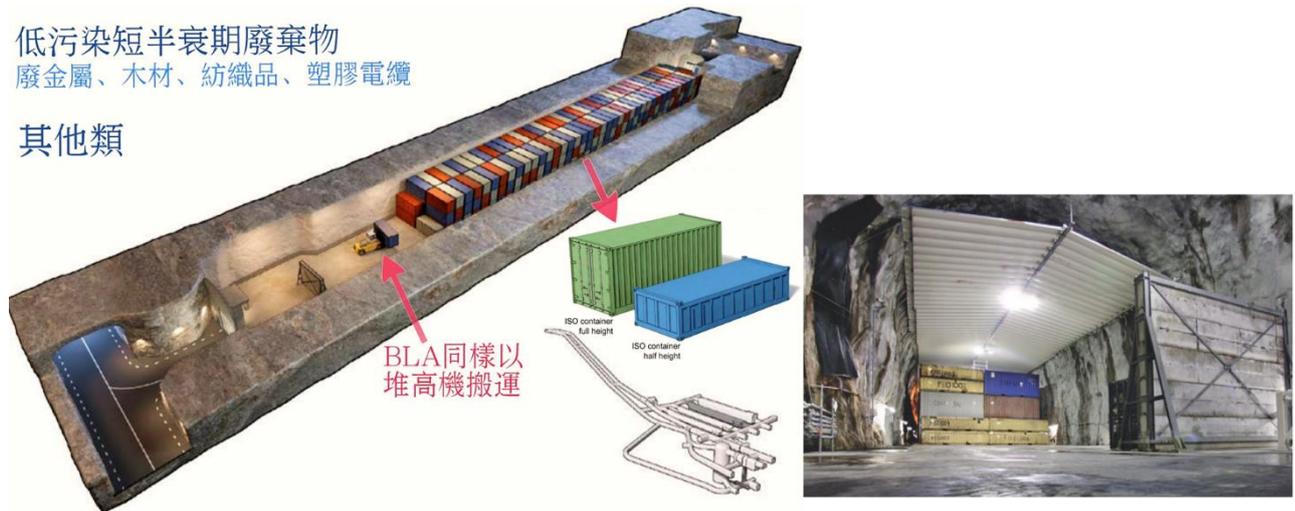


圖 18: BLA 坑道設計與現場實景

(iii) **BMA 坑道:** BMA 寬 19.5 公尺，高 16.5 公尺，坑道工材為混凝土，處置的廢棄物表面劑量率上限為 100 毫西弗/小時，處置容量約 13,090m³，內部隔為 13 個大處置室與 2 個小處置室。BMA 處置污染程度較高的放射性廢棄物，如污染程度較高的離子交換樹脂、濃縮廢液與淤泥等，使用廢棄物箱(moulds)及 55 加侖桶兩種處置容器盛裝。BMA 所處置的廢棄物表面劑量率較高，故現場係以遙控吊車方式搬運廢棄物。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進行封閉。BMA 設計與現場照片如圖 19 所示。

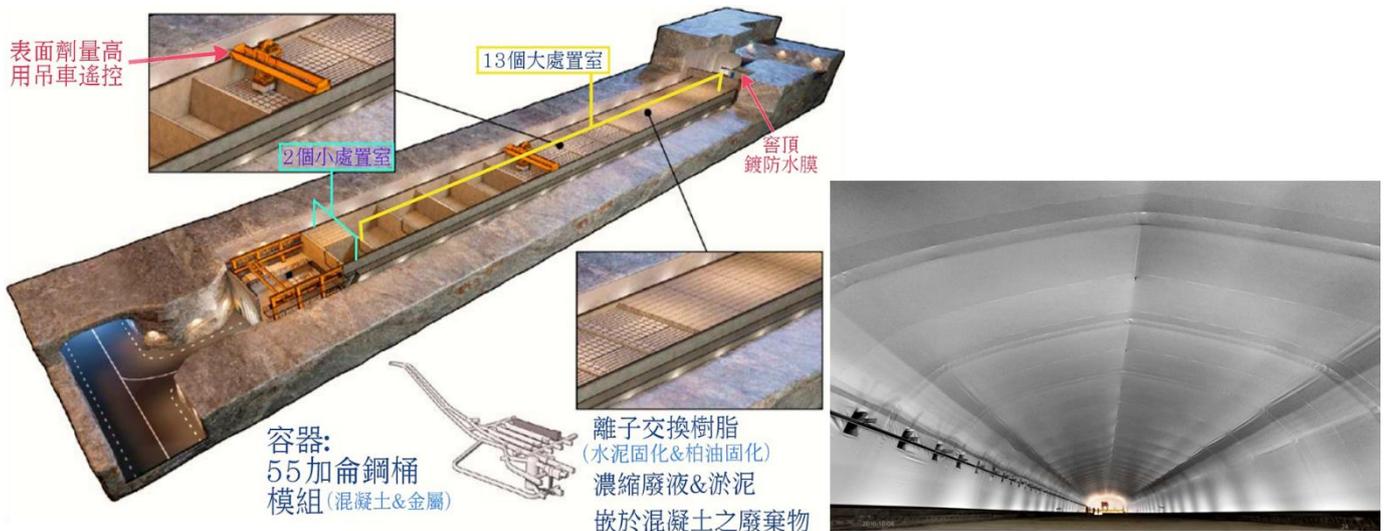


圖 19: BMA 坑道設計與現場實景

(iv) 筒倉(Silo):筒倉為圓柱體型混凝土建築，直徑約 30 公尺，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；筒倉內部分隔成多個處置豎井(shaft)，豎井高度為 50 公尺，最大豎井截面積為 2.5m²，平均可放置 4 箱廢棄物包件或 16 桶 55 加侖桶，廢棄物之間的空隙是以多孔性混凝土回填，處置的廢棄物表面劑量率上限為 500 毫西弗/小時，處置容量約 18,000m³。筒倉所處置的廢棄物活度約佔整個 SFR 的 90%，主要為高污染離子交換樹脂與金屬組件。筒倉所處置的廢棄物表面劑量率高，故係以遙控吊車方式搬運廢棄物。筒倉設計與現場照片如圖 20 所示。



圖 20: 筒倉設計與現場實景

4. 瑞典 SFR 擴建計畫

瑞典除了 Barsebäck 電廠已確定除役外，未來其他電廠待運轉執照到期後也將陸續進行除役，如圖 10 所示，2020 年 Ringhals 與 Oskarshamn 2 座電廠即各有 2 部機組將除役。然而 SFR 目前的處置容量並不足以容納核電廠除役所產放射性廢棄物，鑒於 SFR 成功的營運經驗，SKB 公司於 2008 年啟動 SFR 擴建計畫，規劃於 SFR 原址海床下 120 公尺深度處增建與原 SFR 設施連接的 6 個新處置坑道，使原本約 60,000m³ 的處置容量增加到 189,000m³，用來處置核電廠除役所產廢棄物，並於 SFR 開始接收廢棄物前暫時貯存長半衰期之中、低放射性廢棄物。SFR 擴建完工示意圖如圖 21 所示，藍色部分為增建設施。

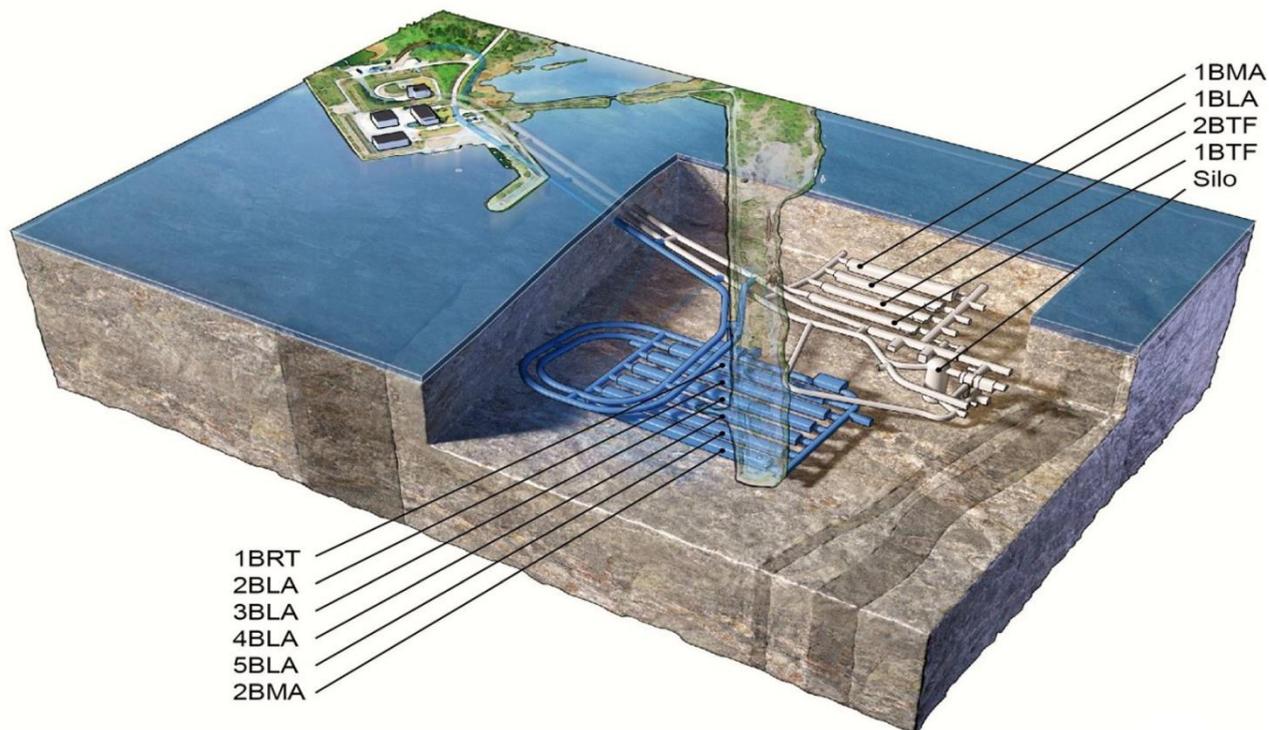


圖 21: SFR 擴建完工示意圖(藍色為增建部分)

新增的 6 個處置坑道，分別為 1 條 BMA、4 條 BLA 以及 1 條 BRT，如圖 22、圖 23、圖 24 所示。

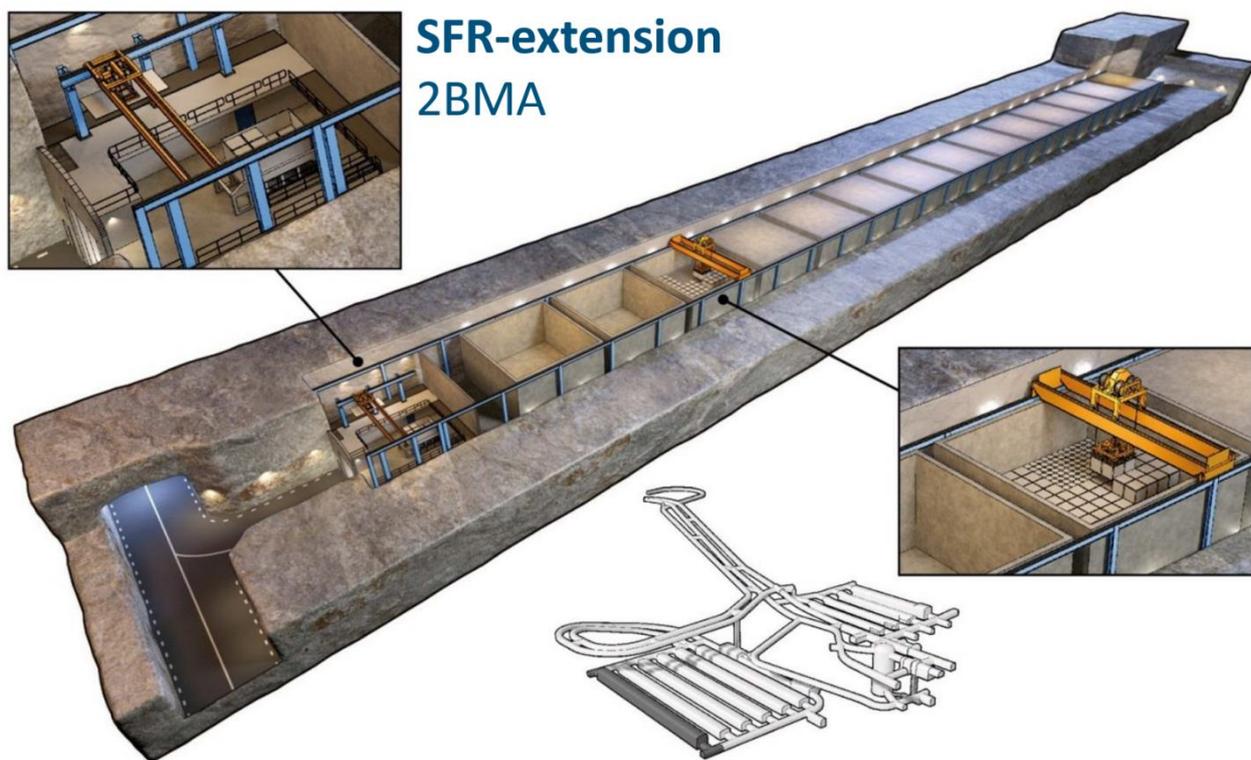


圖 22: SFR 擴建坑道-2BMA

SFR-extension 2 to 5 BLA

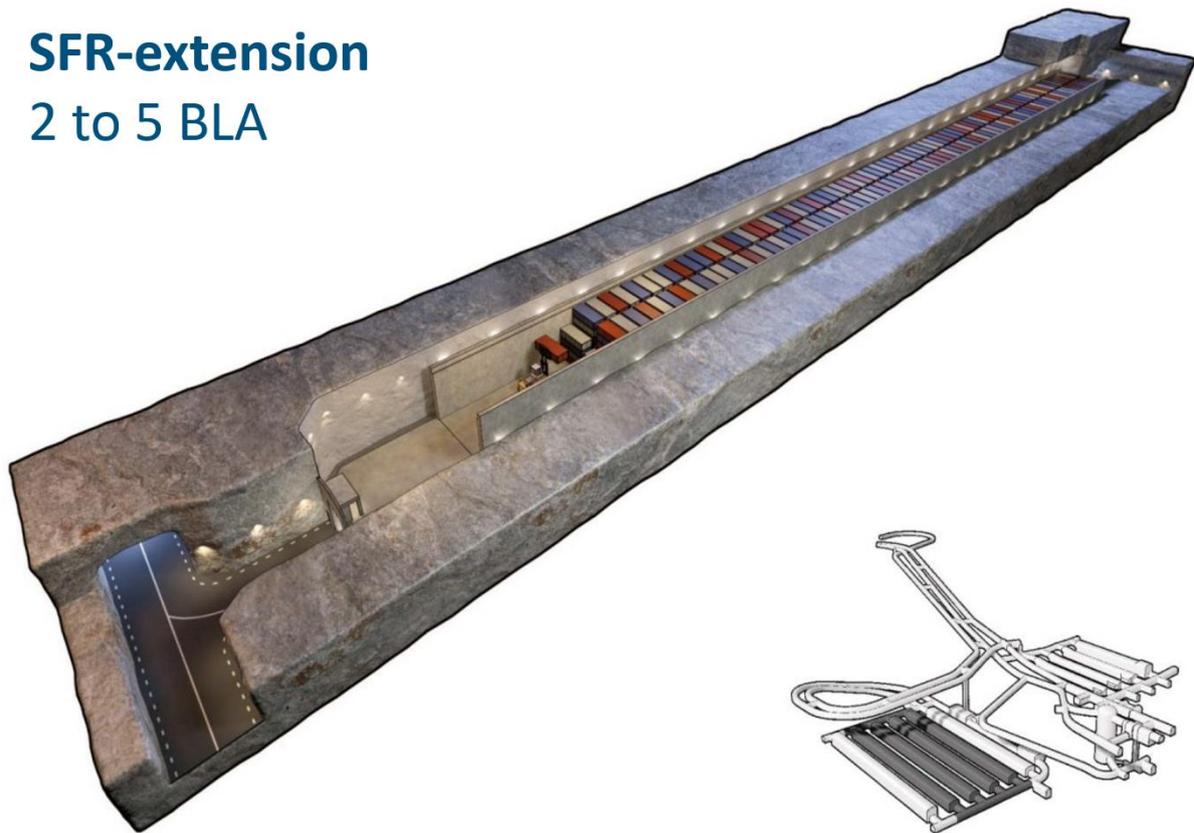


圖 23: SFR 擴建坑道-2~5BLA

SFR-extension BRT

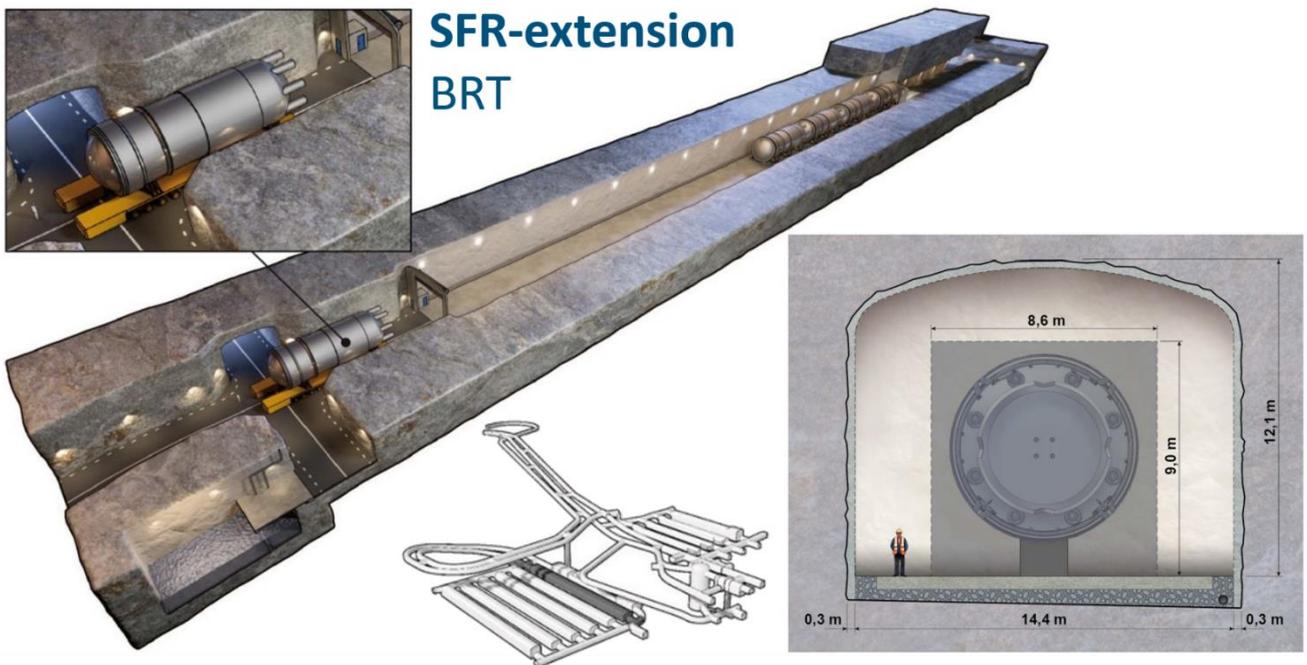


圖 24: SFR 擴建坑道-BRT

增建的坑道中，BMA 與 BLA 的設計概念及所處置的廢棄物與目前運轉中的 SFR 相同，BRT 則是新設計。目前瑞典核電廠除役作業，針對反應器壓力槽，規劃以不做切割的完整型

態(one-piece)直接將整個壓力槽做最終處置，因此於 SFR 擴建計畫中設計了 BRT 坑道做為反應器壓力槽的專用處置坑道。

整體 SFR 擴建計畫始於 2008 年，於 2010 年完成場址調查，2013 年第一季完成擴建設施的設計規劃，並於 2014 年 12 月提出 SFR 擴建的建照申請。SKB 預計可於 2021 年拿到核准的擴建執照，並計畫於 2027 年提出擴建設施試運轉申請，並於 2028 年正式開始營運。

5. 瑞典 SFR 營運管理經驗

瑞典 SFR 最終處置場迄今已營運 28 年，累積豐富經驗，本次會議我方就「廢棄物資料庫管理」及「用過離子交換樹脂最終處置」兩項議題與 SKB 進行交流討論，詳述如下：

(1) 「廢棄物資料庫管理」：瑞典中、低放射性廢棄物生產者要將廢棄物送至 SFR 進行最終處置前，須將每個待處置廢棄物的詳細資訊彙整為一份「廢棄物特性描述」(Waste Type Description, WTD)，於運輸作業前將 WTD 傳送至 SFR 的廢棄物資料庫 Triumph 內，由 Triumph 資料庫系統先進行初步比對工作，確認該份待處置廢棄物的 WTD 格式內容正確且廢棄物狀態符合 SFR 的接收規範，接著再由 SFR 工作人員做進一步確認，確認無誤後由 SFR 發出核准後才能開始將廢棄物運送至 SFR 的運輸作業，而該廢棄物的 WTD 則存入 Triumph 資料庫中以利後續管理。WTD 的格式如圖 25 所示，其格式為 SFR 安全分析報告的一部分，須經核能主管機關審查同意方能使用。WTD 包含的資料有 2 類：「廢棄物基本資料」及「符合接收標準之證明」。基本資料包含廢棄物容器編號、廢棄物類型、處理方式、重量、廢棄物產生日期、各核種與整體活度、表面與距表面 1 公尺處之劑量率，以及活度劑量測量時間。SFR 的 Triumph 資料庫屬單機資料庫，僅 SFR 使用並無與各廢棄物產生單位連線，WTD 數位資料係以光碟或 USB 等實體貯存裝置傳送，這種資料傳輸方式極不方便，且不利 SFR 與廢棄物產生單位的溝通合作，因此 SKB 開發了新的中、低放射性廢棄物最終處置資料庫-“Gaad”。Gaad 為雲端資料庫，供 SFR 以及各廢棄物產生單位連線使用，因此 WTD 可由數位方式傳輸，可大幅節省若需更正時資料傳輸的時間，並能使廢棄物產生單位更加了解 SFR 的管理現況，有助於最終處置工作進行。除此之外，SKB 在資料庫規劃上，係將資料登錄查詢與運算功能拆為 2 個部份，故 Triumph 與 Gaad 為僅用於登錄與查詢使用的資料庫，並另行開發具計算功能的單機程式，用於核種活度衰變計算、比例因數計算、數據統計分析、廢棄物產量預測與處置設施容量等功能。如此規劃，將運算分析功能獨立於資料庫，可釋出伺服器資源，加上資料庫功能單純化，可進一步強化資料庫查詢使用時的效能，

值得參考。

未來 SKB 規劃 Gaad 不僅為 SFR 的資料庫，同時也會做為未來 SFL 的資料庫使用，亦即 Gaad 將會成為瑞典境內所有中、低放射性廢棄物最終處置之資料庫。現階段 SKB 規劃於 2016 年 11 月開始 Gadd 的測試作業，僅由 Oskarshamn 電廠與用過燃料濕式集中貯存設施 Clab 2 個廢棄物生產單位參與測試，Gaad 開發畫面如圖 26 所示，圖中為 SFR 的筒倉管理介面，左側圖型化界面清楚的顯示筒倉內各豎井的運作狀況。

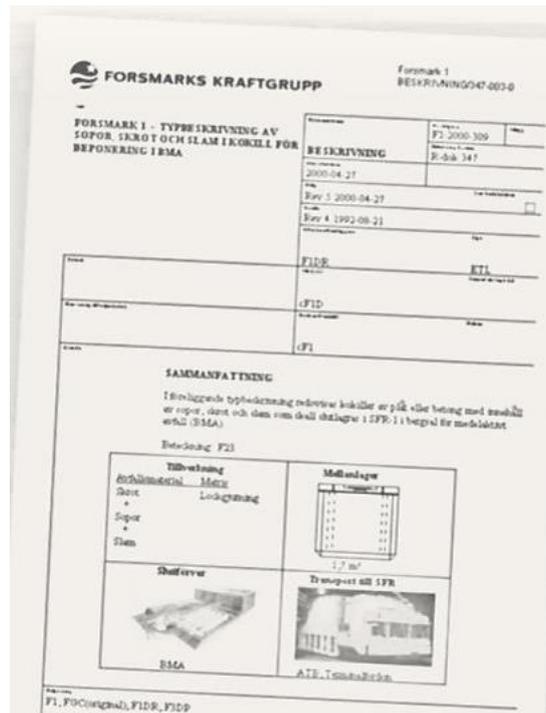


圖 25: SFR WTD 文件格式

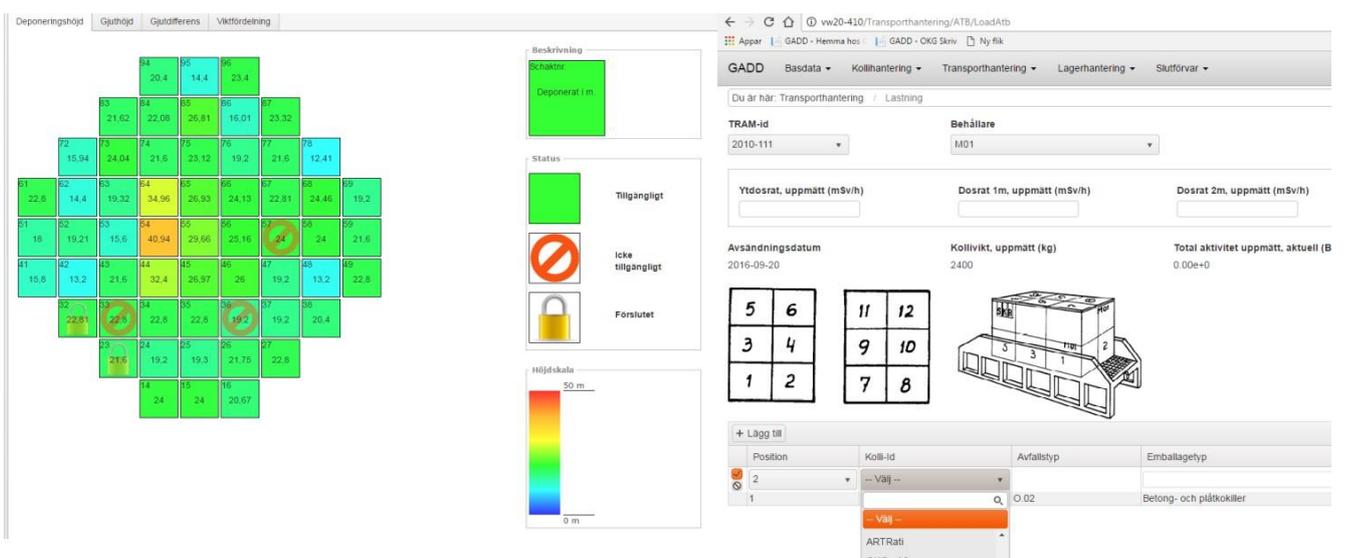


圖 26: Gaad 開發畫面(SFR 筒倉管理介面)

(2) 「用過離子交換樹脂最終處置」：針對電廠運轉所產的用過離子交換樹脂(Ion Exchange Resin, IER)，不同核電廠有不同處理方式，故 SFR 目前所接收處置的 IER 有 3 種型態:僅脫水處理、柏油固化、水泥固化。本節依序述明這 3 種處置型態:

(i) 「僅脫水處理」:電廠所貯存的 IER 並未脫水，係以浸在溶液內的形式貯存。進行處理時，將 IER 用幫浦打入混凝土箱(尺寸:3.3x1.3x2.3 公尺)內，然後再從混凝土箱底部連接設備進行脫水處理。每只混凝土箱約可盛裝 1,500 公斤的 IER，其表面劑量率限值為 10 mSv/hr。盛裝完成後，該混凝土箱即做為處置容器送至 SFR 處置。

(ii) 「柏油固化」:將 IER 以 150°C 高溫乾燥處理後，與柏油一起攪拌均勻後，倒入金屬箱(尺寸:1.2x1.2x1.2 公尺)或 55 加侖桶內，於頂部預留些許空間填入乾淨的柏油，冷卻以金屬頂蓋封蓋。每只金屬箱約可盛裝 1,100 公斤 IER，每個 55 加侖桶約可盛裝 40 公斤 IER，表面劑量率限值為 500 mSv/hr。因柏油耐火性較差，且 SFR 未來關閉後可能會發生柏油吸水膨脹的問題，須做額外的處置處理，因此目前瑞典境內僅 Forsmark 電廠仍在使用柏油固化。

(iii) 「水泥固化」:使用混凝土箱(尺寸:1.2x1.2x1.2 公尺)或 55 加侖桶作為容器，並於容器內安裝拋棄式的攪拌器(如圖 27)，然後將 IER 泵入容器內，加入水泥後將其攪拌均勻，攪拌完成後攪拌器便留在容器內一同處置。容器頂部預留些許空間填入乾淨水泥後封箱，表面劑量率限值為 500 mSv/hr。



圖 27:水泥固化 IER 之拋棄式攪拌器

6. 技術參訪-SFR

本會議第二天為技術參訪行程，由 SKB 公司的 Mr. Magnus Holmqvist 與 Mrs. Inger Nordholm 帶領參訪 SFR，如圖 28 所示。本次行程原預定參訪 SFR 地下設施，然因 SFR 安全檢查儀器臨時故障，當天所有參訪都被取消，故改為參訪 SFR 地表設施及 SFK 處

置場預定地，並由 Mrs. Inger Nordholm 針對 SFK 建置、SFR 擴建、公眾溝通等議題進行簡報後討論交流。



圖 28:技術參訪現場合照(右 1: Mr. Magnus Holmqvist 右 2: Mrs. Inger Nordholm)

SFK 建置與 SFR 擴建內容已於前節詳述，本節針對公眾溝通議題討論結果摘要如下：

- (1) 在地化經營:針對 SFR 鄰近地區的公眾溝通作業，因當地居民彼此間生活工作多有往來，彼此都很熟悉，甚至大部分有親戚關係，形成緊密連結的社群，故 SKB 聘用 Forsmark 當地人進行 SFR 鄰近地區的公眾溝通作業，圖 28 中的 Mrs. Inger Nordholm 即為土生土長的當地居民。溝通作業的重點，在於耐心與當地民眾保持良好的互動關係，藉由頻繁舉辦生活化的非正式會晤(Casual Meeting)與居民分享生活的點滴，參與當地社群大大小小的各式活動，融入整體社群中，獲得當地民眾的接納後再進一步傳達想說明的理念。
- (2) 發行當地資訊為主的雜誌:SKB 在 Forsmark 定期發行免費期刊「Lagerbladet」，封面如圖 29 所示。該期刊主要內容為當地所發生的事情，報導的主角也都是以當地居民為主，因此可有效吸引當地社群訂閱，甚至可以幫助當地居民發聲，進而提升當地民眾對 SKB 的認同感。以圖 30 為例，Forsmark 當地的酪農對政府相關政策不滿，組成聯盟進行合作並表達訴求，便係透過 Lagerbladet 的專題報導表達其訴求，以獲得政府的關注。在這類事件中，當地民眾便能感受到 SKB 的善意，俾使相

關溝通作業更加順利。



圖 29:SKB 發行之 Lagerbladet 期刊封面



圖 30:SKB 發行之 Lagerbladet 報導

(3) 專責公司必要性:Forsmark 地區除了有 SFR 及 SFK 計畫外，瑞典國營電力公司 Vattenfall 的 Forsmark 核電廠也位於此地區。Mr. Magnus Holmqvist 表示，過往 Vattenfall 在當地推行核電廠建置營運的相關計畫時，溝通作業執行成果不佳，使

得當地居民對 Vattenfall 頗為感冒，因此早期 SKB 成立前 Vattenfall 為 SFR 計畫於當地進行溝通工作時阻礙難行，直到成立 SKB 轉由 SKB 接手並以不同方式執行溝通作業，與過往 Vattenfall 的當地負面形象做切割後，SFR 的溝通作業才能順利推展。

肆、心得及建議

- 一、 德國GNS公司研發的用過核子燃料運輸兼貯存用金屬護箱CASTOR®，其輻射屏蔽功能與耐久性均相當良好，亦有豐富使用實績，GNS公司也可針對特殊需求專門開發適用的金屬護箱。用過核子燃料乾式貯存採混凝土或金屬護箱皆可符合相關安全規定，本公司遵照相關法規推動乾貯計畫，德國情境雖與我國不同，然其成功的乾貯推行經驗仍有值得借鏡之處，未來也有與本公司合作的可能性，建議持續與對方保持聯繫與交流，以待未來合作。
- 二、 瑞典用過核子燃料最終處置場SFK以及短半衰期中低放射性廢棄物最終處置場SFR擴建計畫目前皆正在申請建造執照，我國用過核子燃料及低放射性廢棄物最終處置概念分別與SFK和SFR近似，故SKB於執照申請過程中的技術累積、審查意見往返、甚至後續的建場作業皆值得我國借鏡，建議與此議題上持續與對方保持聯繫與交流，以待未來合作。
- 三、 本公司所建置的低放最終處置資料庫，其開發歷程與SKB相似，而瑞典SFR迄今累積了28年的營運經驗，期間逐步修正使其資料庫更趨完備。本次會議SKB所提供有關其Triumf資料庫與開發中的Gaad新資料庫的資訊對本公司資料庫開發幫助極大，建議與此議題上持續與對方保持聯繫與交流，保留未來進一步合作的機會。
- 四、 SKB公司於Forsmark地區除了SFR以外，得以進一步推展SFK計畫與SFR擴建計畫，當地民眾的同意是最重要的因素，故本次會議SKB所提供的公眾溝通經驗與策略極為寶貴，建議可從中汲取適合我國情境的部分加以酌用。