

出國報告(出國類別：參訪)

瑞士除役電廠暨
放射性廢棄物處理設施
參訪及技術交流

服務機關： 台灣電力公司
核能後端營運處、第一核能發電廠
姓名職稱： 劉興漢 副廠長
簡國元 主管
陳國光 課長
派赴國家： 瑞士
出國期間： 112年10月16日~112年10月25日
報告日期： 112年12月11日

摘要

本次行程可分為三部分，第一部分為瑞士除役電廠(KKM)及瑞士核能協會(Swissnuclear)參訪，瞭解電廠除役現況、瑞士能源規劃及後端基金使用情況，第二部分為瑞士放射性廢棄物暫時貯存設施(Zwilag)參訪，瞭解瑞士廢棄物集中管理及其除污減容設施，第三部分為瑞士放射性廢棄物處置專責機構(Nagra)參訪，瞭解瑞士放射性廢棄物最終處置計畫執行現況、反應器及內部組件切割之活化分析技術(AMAC)。

KKM 電廠是瑞士第一座除役電廠，其反應爐型式亦與核一廠相同為 BWR-4，自 2020 年 1 月開始除役，除役年限 15 年，預計將於 2034 年完成，目前 KKM 電廠用過燃料已全數移出，比預計時程提早約 1 年(原訂 2024 年底完成)，此次參訪對核一廠除役工作有相當助益，舉凡設備拆除切割、廢棄物流管理、WMA 建置/除污經驗及離廠外釋量測經驗等都獲益良多。Swissnuclear 是瑞士核能協會，代表核電業者就核電相關議題，例如；公眾溝通、廢棄物管理、知識交流、經驗傳承..等與政府、民眾以及管制機關溝通，致力優化改良核能電廠的內外部條件，以利核電廠之安全營運。

Zwilag 是瑞士集中式暫時(interim)貯存設施，主要存放瑞士境內放射性廢棄物，瑞士聯邦政府於 1996 年 8 月核准興建 Zwilag，並於 2001 年開始接收及採乾式貯存方式存放用過核子燃料與其它各類放射性廢棄物。設施內也擁有處理低放射性廢物處理設施，使廢棄物可適合最終儲存，設施包括廢棄物分類、壓實、廢液處理和固化處理及新型電漿融熔設備等。

Nagra 是為瑞士的放射性廢棄物處置專責機構，主要負責全國的放射性廢棄物最終處置場之選址研究、地質調查、規劃設計、申照、建造以及營運管理及封閉監控等任務。有關最終處置場址研究，瑞士目前已決定以 Nördlich Lägern 作為建議候選場址送交聯邦議會審查，預定於 2030 年送國會辦理公投，2031 年決定最終處置場的法定場址。另在放射性廢棄物管理部分，Nagra 有建立放射性廢棄物資料庫(ISRAM)，儲存瑞士全境的放射性廢棄物特性資料，以利掌握所有核能設施之放射性廢棄物總量，此外，Nagra 也有開發 AMAC 技術，可供電廠進行除役拆除規劃、切割策略選擇及廢棄物容器與數量評估時之依據。

目 錄

壹	出國目的.....	1
貳	出國過程.....	3
參	工作內容.....	4
一、	瑞士除役電廠 KKM 參訪.....	4
二、	瑞士國家放射性廢棄物處置合作社(Nagra)	14
三、	瑞士核能協會 (Swissnuclear).....	21
四、	放射性廢棄物集中式貯存設施 (Zwilag)	25
肆	心得.....	31
伍	建議.....	33

圖目錄

圖 1：KKM 電廠位置及外觀.....	5
圖 2：KKM 電廠除役時程.....	5
圖 3：KKM 除役經驗討論交流.....	6
圖 4：KKM 除役經驗分享.....	6
圖 5：主蒸氣管路切割前/後外觀.....	8
圖 6：主蒸氣管路切割機具.....	8
圖 7：蒸氣管路切割後隔離及標示.....	8
圖 8：簡易棚架.....	9
圖 9：緩衝區及搬運箱.....	10
圖 10：KKM 電廠廢棄物處理設施及配置.....	11
圖 11：臨時性貨梯.....	11
圖 12：大型量測箱.....	12
圖 13：Zwibez 貯存設施.....	13
圖 14：KKG 電廠用過燃料濕式貯存設施.....	13
圖 15：台電公司參訪人員與 Nagra 代表於會議中合影.....	14
圖 16：Nördlich Lägern 建議場址位置.....	16
圖 17：瑞士放射性廢棄物最終處置計畫時程.....	16
圖 18：AMAC 技術之處理步驟.....	18
圖 19：AMAC 方法所使用的程式與功能說明.....	18
圖 20：RPV 及內部組件之中子活化分佈 3D 立體模型.....	19
圖 21：ALGOPACK 評估適用廢棄物盛裝容器原理.....	19
圖 22：ALGOPACK 依據活度與重量篩選容器之邏輯.....	20
圖 23：ALGOPACK 可配合資料庫分析不同容器廢棄物盛裝結果.....	20
圖 24：Swissnuclear 協會代表與駐瑞士台北代表處官員、台電參訪人員合影.....	21
圖 25：瑞士淨零碳排的電力結構本分析(來源：Swissnuclear).....	24
圖 26：Zwilag 代表與駐瑞士台北代表處官員、台電公司參訪人員合影.....	25
圖 27：瑞士 ZWILAG 集中式貯存設施廠區空照圖 (來源:Zwilag).....	26
圖 28：瑞士 ZWILAG 集中式貯存設施示意圖 (來源:Zwilag).....	26
圖 29：瑞士 ZWILAG 電漿熔融與玻璃固化設備.....	27
圖 30：電漿熔爐構造.....	28
圖 31：常溫狀態下的玻璃固化材料.....	29
圖 32：初始廢料桶(熔融前).....	29
圖 33：瑞士低放廢棄物貯存處置容器.....	30
圖 34：最終處置桶內容物剖面構造.....	30

壹 出國目的

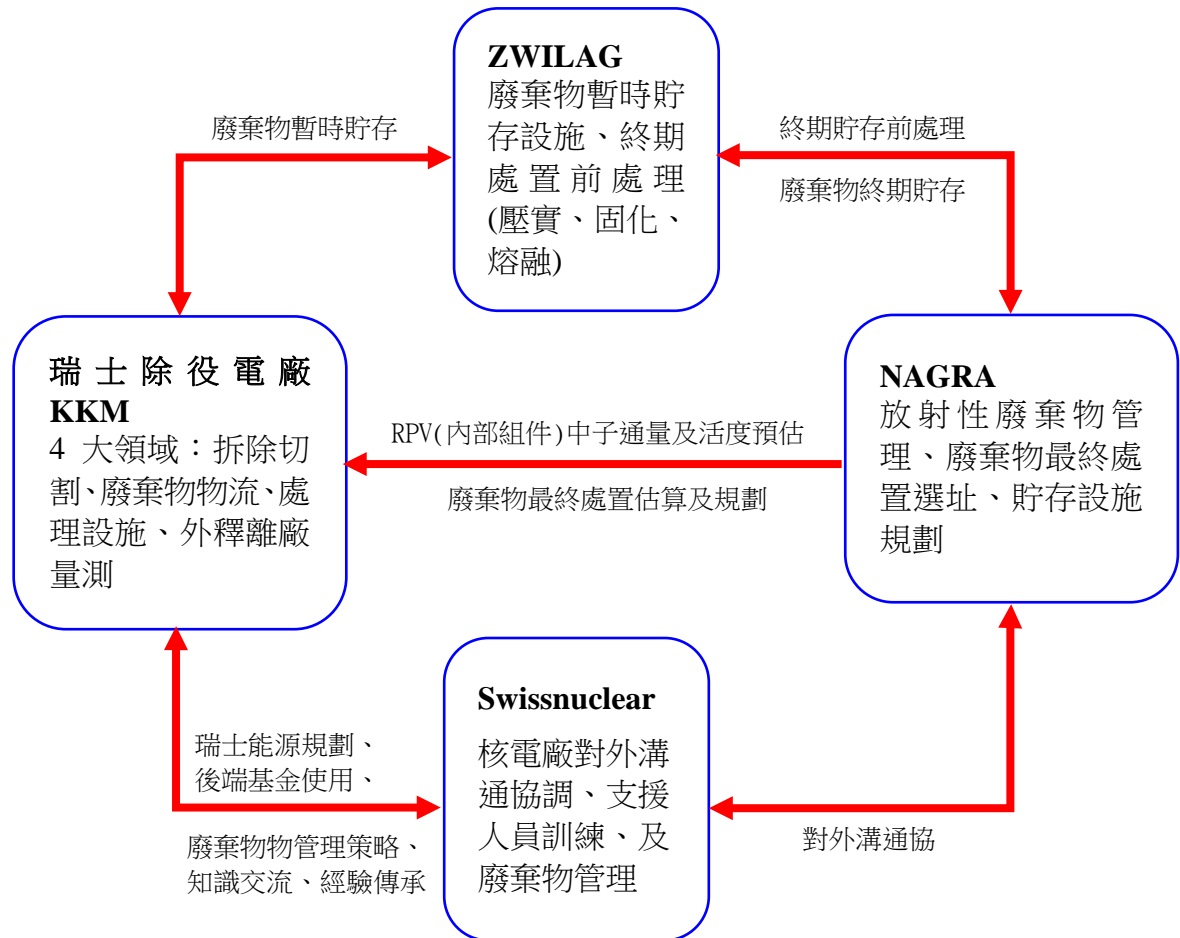
核一廠於 108 年 7 月進入除役，為國內首座除役電廠，為因應核一廠除役作業的推展，需引進與持續學習國際除役經驗及技術，爰規劃參訪國外除役電廠與放射性廢棄物管理機構，考察國外除役技術與實務做法，建立專家交流管道，從中學習關鍵技術及經驗，以利推動與執行核電廠除役作業。

本次出國主要參訪瑞士除役電廠 KKM(順道參訪 KKG 及 KKB 電廠)、瑞士核能協會(Swissnuclear)、瑞士放射性廢棄物暫時貯存設施(Zwilag)及瑞士放射性廢棄物處置專責機構(Nagra)。參訪 KKM 電廠目的是該電廠為瑞士第一座除役電廠，其反應爐型式亦與核一廠相同為 BWR-4，目前 KKM 電廠用過燃料已全數移出，由 TAG 資訊得知 KKM 電廠在設備拆除切割、物流管理、WMA 除污設施設置及外釋量測等作法均值得核一廠參考，故安排此次參訪。

Zwilag 是瑞士集中式暫時(interim)貯存設施，主要存放瑞士境內放射性廢棄物，接收及採乾式貯存方式存放用過核子燃料與其它各類放射性廢棄物。設施內也擁有處理低放射性廢物處理設施，參訪目的是瞭解瑞士低放射性廢物處理設施管理、除污及減容設施。Swissnuclear 是瑞士核能協會，主要負責代表核電業者就核電相關議題與政府、民眾以及管制機關溝通，例如；協助核電業者評估基金需用數額、評估公眾溝通、廢棄物管理、知識交流、經驗傳承..等，參訪目的是瞭解瑞士除役基金及廢棄物管理策略。

Nagra 是為瑞士的放射性廢棄物處置專責機構，主要工作包括掌握所有核能設施之放射性廢棄物總量、針對放射性廢棄物管理，擬定統一的行政程序與允收標準、負責全國的放射性廢棄物最終處置場之選址等，此次參訪目的是瞭解瑞士放射性廢棄物管理、最終處置場選址執行方式及 Nagra 開發之 AMAC 技術，其中 AMAC 技術可供核一廠後續反應爐(含內部組件)及生物屏蔽牆拆除規劃、切割策略選擇及廢棄物容器與數量評估時的依據。

參訪設施相關連結整理如下：



貳 出國過程

本次出國自 112 年 10 月 16 出發至 10 月 25 日返國共計 10 天，主要行程可分為三部分，第一部分為瑞士除役電廠(KKM)參訪，瞭解其除役現況，並順道參訪 KKG、KKB 電廠及瑞士核能協會(Swissnuclear)瞭解電廠廢棄物貯存管理、瑞士能源規劃及後端基金使用情況，第二部分為參訪瑞士放射性廢棄物暫時貯存設施(Zwilag)，瞭解瑞士廢棄物集中管理及其除污減容設施，第三部分為參訪瑞士放射性廢棄物處置專責機構(Nagra)，瞭解瑞士放射性廢棄物管理、最終處置計畫執行現況、反應器及內部組件切割之活化分析技術。

本次參訪行程及工作內容如下表所示：

日期	地點	工作內容
10 月 16 日~ 10 月 17 日	台灣到瑞士(蘇黎世)	去程
10 月 18 日	瑞士 伯恩	參訪 Mühleberg (KKM)除役電廠並進行技術討論
10 月 19 日	瑞士 下格斯根	參訪 Gösgen(KKG)電廠並進行技術討論
10 月 20 日	瑞士 韋廷根	參訪瑞士放射性廢棄物處置專責(NAGRA)機構並進行技術討論
10 月 21 日~ 10 月 22 日	瑞士 巴登	週六、日
10 月 23 日	瑞士 維倫林根	參訪 Beznau(KKB)電廠並進行技術討論
10 月 24 日	瑞士 維倫林根	參訪 Swissnuclear 與 Zwilag 集中式貯存設施並進行技術討論
10 月 25 日	瑞士(蘇黎世)到台灣	回程

參 工作內容

一、 瑞士除役電廠 KKM 參訪

瑞士共有 4 座核能電廠、5 部核能機組，4 座核能電廠分別為 Mühleberg (KKM)、Gösgen (KKG)、Beznau (KKB) 及 Leibstadt (KKL)，4 座電廠中除 KKM 電廠自 2020 年 1 月開始除役外，其餘 3 個電廠目前仍持續發電運轉中，各電廠型式、輸出功率及機組狀況整理如下：

plant	Reactor type	Unit No.	Net MWe	機組狀況
Mühleberg (KKM) 米勒貝格電廠	BWR-4	1 部機	390	除役中
Gösgen (KKG) 格斯根電廠	PWR	1 部機	970	運轉中
Beznau (KKB) 貝茲瑙電廠	PWR	2 部機	365	運轉中
Leibstadt (KKL) 萊布施塔特電廠	BWR	1 部機	1220	運轉中

本次主要是參訪瑞士除役電廠米勒貝格核電廠(KKM，如圖 1)，瞭解其除役現況、現場實務作為與經驗交流，並順道參訪 KKG 及 KKB 電廠瞭解其廢棄物處理及貯存方式。KKM 電廠是瑞士第一座除役電廠，目前員工人數約 280~300 人。自 1972 年 11 月開始商轉至 2019 年 12 月永久停機，並自 2020 年 1 月開始除役，除役年限 15 年，預計將於 2034 年完成，KKM 電廠除役時程規劃如圖 2。目前 KKM 電廠用過燃料已全數移出，比預計時程提早約 1 年(原訂 2024 年底完成)。

參訪當日上午抵達 KKM 電廠後，由 BKW 電力公司人員(負責除役策略主管及拆除主管，BKW 為 KKM 電廠所屬電力公司) 進行 KKM 電廠除役現況說明，在進行簡短討論後，隨即到反應器廠房及汽機廠房現場勘查，瞭解現場除役狀況，下午則由本公司進行除役現況說明，KKM 並召集電廠除役專家進行討論及交流(如圖 3、圖 4)。

KKM 在除役整體運作管理分工上，包括：設備拆除切割、廢棄物流管理、WMA 建置/除污及離廠外釋量測等四大領域。以下就此次參訪內容，依此四大方向重點摘述如下：



圖 1：KKM 電廠位置及外觀

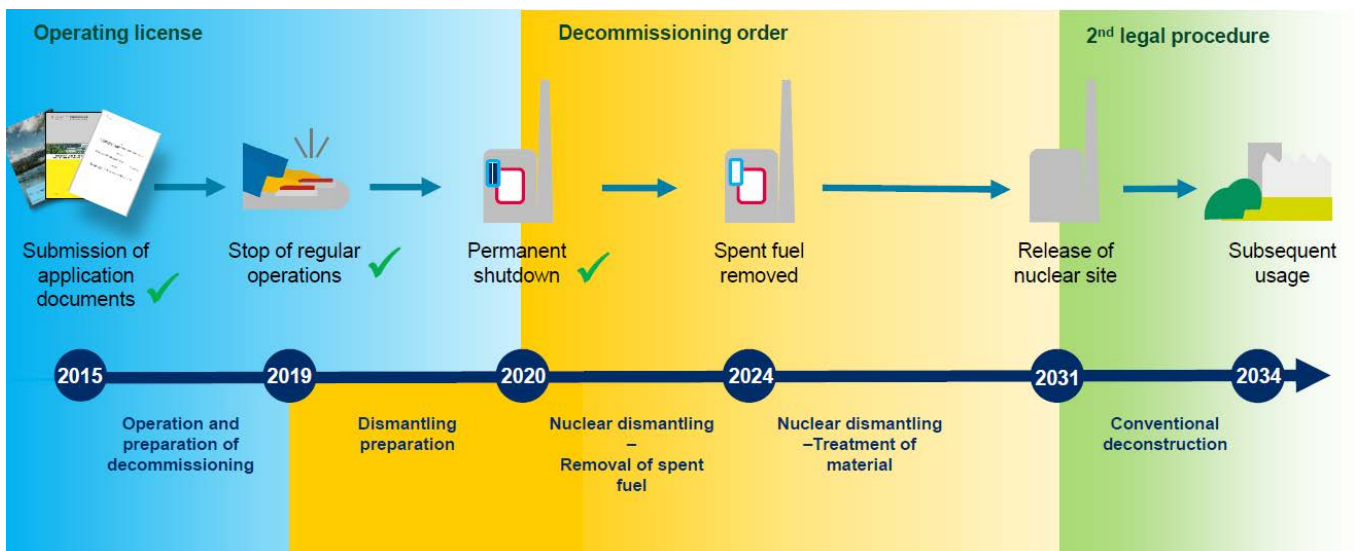


圖 2：KKM 電廠除役時程



圖 3：KKM 除役經驗討論交流



圖 4：KKM 除役經驗分享

(一)廢棄物拆除切割

1. 除役方案陳報審查：KKM 電廠僅 RPV 及內部組件切割、生物屏蔽牆拆除、拆除 Logistics 方案、輻射防護方案需送管制機關審核，其餘拆除計畫皆不需陳報。
2. 系統拆除切割前，KKM 電廠系統隔離、盤面處理、臨時及留用設備的處理建置作法整理如下：
 - (1) 系統隔離做法：KKM 電廠系統隔離做法是 system by system 隔離(洩水、洩油、洩壓)，隔離後相關管路、設備會噴粉紅漆識別，此作業由運轉值班人員執行。隔離後拆除前則由拆除部門對欲拆除物件噴藍漆，因此有噴藍漆的設備才可拆除，拆除則是 room by room 執行。
 - (2) 隔離盤面之電纜處理：在各別 room 內隔離盤面之 power cable/儀控線，其在設備隔離後會將其剪斷。其在該 room 內之部分會從設備端直到穿牆到另一房間無法辨識前的部分，亦予以剪斷。
 - (3) 電纜托架(cable tray)之電纜處理：針對電纜托架可能有放置多個系統電纜的處理方式為待托架上全部系統均已隔離再一併移除該托架上電纜。
 - (4) 一次圍阻體通風設備停用處理：一次圍阻體通風設備停用，另設置臨時通風抽氣加上過濾器(filter)及流程輻射偵測器(PRM)。
 - (5) Torus 區域 sump pump 電源處理：在 torus 區域設備已開始拆除時，然該區域之 sump pump 仍須維持可用，所以對該 pump 另拉臨時之 power cable 及儀用信號線。
3. 拆除切割規劃：KKM 電廠員工人數約在 280 至 300 人，大型或專業性高之切割，如反應器切割，是整體發包執行，其餘則是自己員工規劃、執行，相關勞務人力則以人力包輔助。如主蒸氣管路(main steam line, MSL)切割(如圖 5~圖 7)，是由員工自行規劃執行，於市場上採購既有之 360 度環形自動切割機具，調整尺寸大小進行切割。
4. 簡易棚架搭設：拆除現場附近會建立帳棚(如圖 8)，在其內對拆除物進行初步切割到可裝入搬運箱內，再運送至 WMA 進行細切，包括管路對半剖切。現場的帳棚並不會嚴格密封，係以抽氣方式進行排

氣、過濾，另棚架的通風經由棚內管路抽氣過濾，進氣由棚架四週進入，藉此形成棚內負壓。

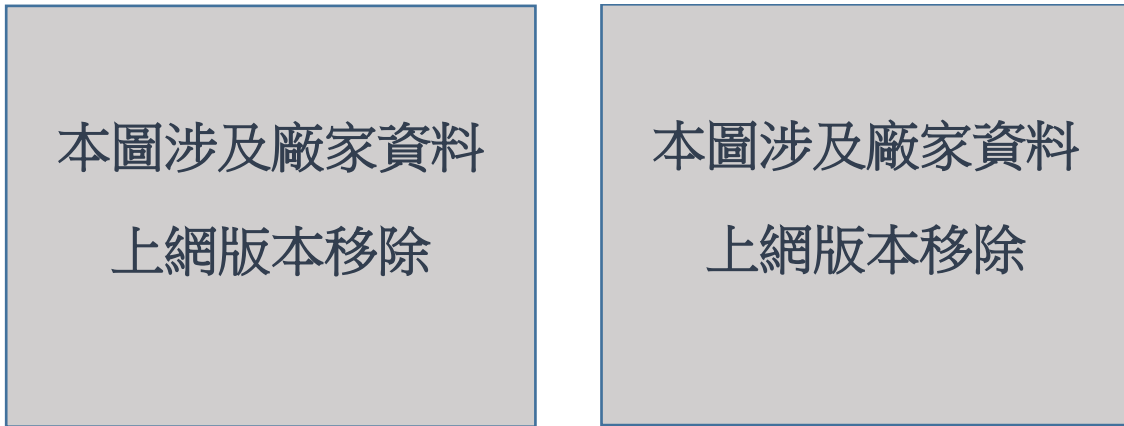


圖 5：主蒸氣管路切割前/後外觀

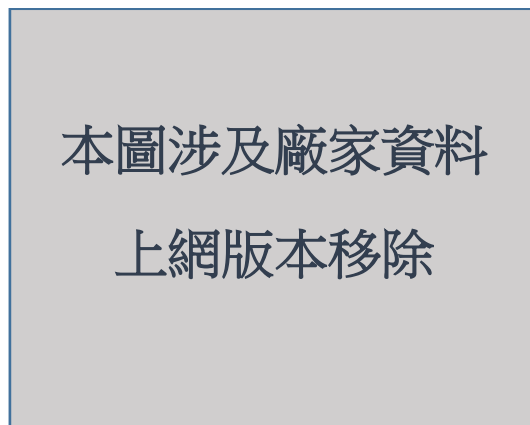


圖 6：主蒸氣管路切割機具

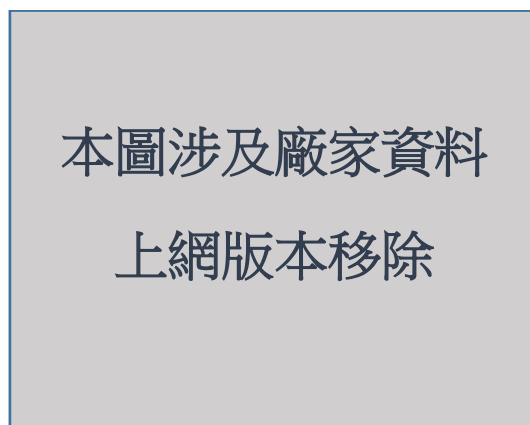


圖 7：蒸氣管路切割後隔離及標示



圖 8：簡易棚架

(二)廢棄物物流管理(logistics)

1. 廢棄物分類：KKM 電廠將廢棄物分成 3 大類，分別為放射性廢棄物 (radioactive waste)、待除污廢棄物 (material that needs to decontamination)及清潔廢棄物(clean, recyclable material)。
2. 物流管理：除役運作可區分為切割部門(Cutting)、廢棄物處理部門 (WMA)、量測部門(Measurement)及物流管理部門(Logistics)。因為在切割和廢棄物處理運作步調會不一致，因此兩者間需要靠緩衝區(如圖 9)處理。所以，在現場設置很多的緩衝區，地面上會畫出緩衝區邊界線，緩衝區內就存有一箱箱的拆除物件。而在緩衝區會建有條碼(QR Code)，掌握緩衝區內之箱體資料。
各搬運箱及廢棄物緩衝區皆貼有條碼(QR code)，管理追蹤廢棄物物流，現場區域設置有物流管理電腦工作站，以登錄物流資訊。
3. 搬運箱分類：搬運箱依盛裝的廢棄物分為清潔及污染廢棄物，各搬運箱除以條碼辨識外，亦可由上蓋顏色區分，上蓋為布面材質，綠色為清潔廢棄物，黃色為污染廢棄物(如圖 9)。

本圖涉及廠家資料 上網版本移除

圖 9：緩衝區及搬運箱

(三)廢棄物處理設施(WMA-Waste Management Area)

1. 處理設施建置：KKM 電廠廢棄物處理設施簡稱為 MTF (Material Treatment Facilities)，相當於本廠 WMA，相關設施建置在汽機廠房。KKM 電廠處理設施及其配置如圖 10，設有切割及除污兩大功能設施，處理設施自 2020 起陸續建置運轉，相關設施整理如下：
 - (1) 切割設備：包括帶鋸機(band saw)及熱熔切割(plasma thermal cutting)，其中 plasma 切割用於厚的物件，切割速度較快。
 - (2) 除污設備：包含濕式(wet decontamination)及乾式(dry decontamination)兩大類。濕式是高壓水除污，乾式有設置 3 種設備分別為滾筒式、噴砂房及小型手套箱噴砂。
2. 廠房廢棄物搬運設備：KKM 電廠建置有下列設備，以利廠房內廢棄物搬運，摘述如下：
 - (1) 在反應器廠房及汽機廠房各增設 2 具臨時性貨梯(如圖 11)，為單支撐架式，非正式貨梯。
 - (2) 現場廢棄物搬運箱運送，主要是使用以人員牽引之手動或電動拖板車、堆高機等，非使用坐在駕駛座操作之堆高機。
 - (3) 在廢棄物量測區域設置有簡易吊車，以方便廢棄物吊運，吊車下方掛接磅秤量測廢棄物重量。
3. 除污經驗：KKM 電廠相關經驗摘述如下
 - (1) KKM 電廠沒有執行系統化學除污，理由是藉由核種自然衰變即可降低工作劑量。

- (2) KKM 電廠針對污染較高之設備，除污分成兩段式，第一段是用高壓水濕式除污，第二段用乾式噴砂。其原因為第一段濕式先除去大量污染物及油脂，避免乾式噴砂機內部及砂粒被重度污染或油脂黏著，之後再以乾式噴砂除污到達可離廠標準。濕式除污二次廢液之處理不用樹脂(resin)，而是用 3 道 filter 並使用蒸發器，處理後幾乎沒有二次廢液的問題。
- (3) 針對管路(pipe)是否剖開以利除污與量測議題；由於離廠量測均需對其污染面進行量測，因此 KKM 電廠對管路有對半剖開以利除污及離廠量測，至於幾吋以下管路不再值得剖半處理，則由電廠自行評估決定。
- (4) 因焊料有天然核種，所以管路焊道均直接切除以低放廢棄物處理。

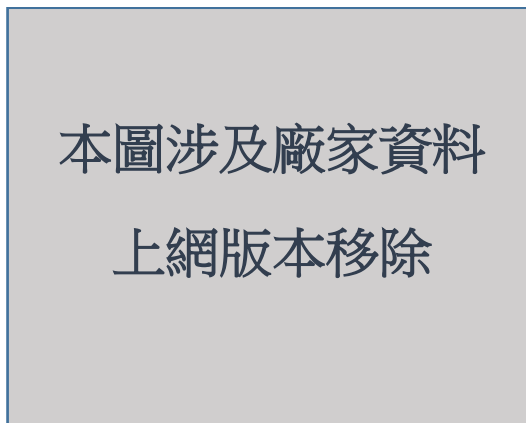


圖 10：KKM 電廠廢棄物處理設施及配置



圖 11：臨時性貨梯

(四)外釋(free release)離廠

1. 外釋離廠：瑞士法規接受 free release(亦即 clearance)，與我們運轉期間的外釋、放行及除役期間的離廠量測方案一樣。其 free release 即是自由釋放至環境社會，亦無須熔融稀釋。
2. 發電機離廠量測：KKM 電廠發電機之 Free release 不必切割，直接整件移出後以單槍式純鍍偵檢器量測，符合標準即進行 Free release。
3. 汽機 rotor 處理：KKM 電廠之汽機 rotor 則送至瑞典進行融熔，分離放射性污染部分後，瑞典留下除污後乾淨的金屬，剩餘污染廢棄物運回瑞士。之後，在參訪 Zwilag 時(瑞士之中期集中式貯存設施，同時具有除污外釋與 Plasma 熔融減容作業之設施)，詢問為何 KKM 之汽機 rotor 不送至 Zwilag 除污，而要送至瑞典處理。Zwilag 人員說明因為他們的除污間空間較小，無法處理 rotor。
4. Torus 可外釋：KKM 電廠基本上，以 Drywell 及 MSIV 為分界，以外的部分可做到除污外釋。
5. 離廠量測區域設置：KKM 電廠離廠量測區設在汽機廠房 1 樓，以手持式表面量測後，其旁設有大型量測箱(如圖 12)，量測通過後即可 free release。
6. 手持量測時，係以電動吊具下附磁鐵，以磁鐵將待測物件自箱內吊出置放於桌子上進行量測。



圖 12：大型量測箱

瑞士電廠在 KKB 及 KKG 廠內設有暫時(interim)貯存設施貯存用過核子燃料，然 2 個電廠的貯存方式不同，其中 KKB 電廠採乾式護箱貯存方式，將用過燃料貯存在 Zwibez 貯存設施(如圖 13)，Zwibez 貯存設施位在 KKB 電廠廠區內。另 KKG 電廠為濕式貯存方式(如圖 14)，將用過燃料貯存在用過燃料池，KKG 電廠為增加用過燃料貯存空間，另建置新的用過燃料設施，可容納 1008 個燃料組件(fuel assembly)並於 2008 年啟用。現行 KKB 運轉產生之廢棄物貯存，例如；離子交換樹脂及淤泥殘渣等，先經固化處理後移至 Zwibez 存放，KKG 電廠除少數貯存在廠內，多數則產生之棄物分別存放在 Zwilag 貯存設施。



圖 13：Zwibez 貯存設施



圖 14：KKG 電廠用過燃料濕式貯存設施

二、 瑞士國家放射性廢棄物處置合作社(Nagra)

Nagra (National Cooperative for the Disposal of Radioactive Waste) 由電力公司(核能電廠營運者)和聯邦政府於 1972 年共同出資成立，Nagra 為瑞士的放射性廢棄物處置專責機構，主要負責全國的放射性廢棄物最終處置場之選址研究、地質調查、規劃設計、申照、建造以及營運管理及封閉監控等任務。

因我方於參訪前即已先與 Nagra 負責接待本次參訪的人員聯繫，雙方預先就設定技術交流會議之議題溝通討論，以利 Nagra 選派適當專家參加交流，我方依據本次參訪之目的提出三項議程提案：1. 瑞士放射性廢棄物管理架構與程序、2. 除役核能電廠與 Nagra 之間的放射性廢棄物管理界面、3. 反應器與內部組件切割之活化分析技術與應用案例，邀請負責放射性廢棄物特性與總量管理人員以及負責先進式活化分析(Nagra Advanced Methodology for Activation Characterization, AMAC)技術開發者共同參加技術交流會議(圖 15)。

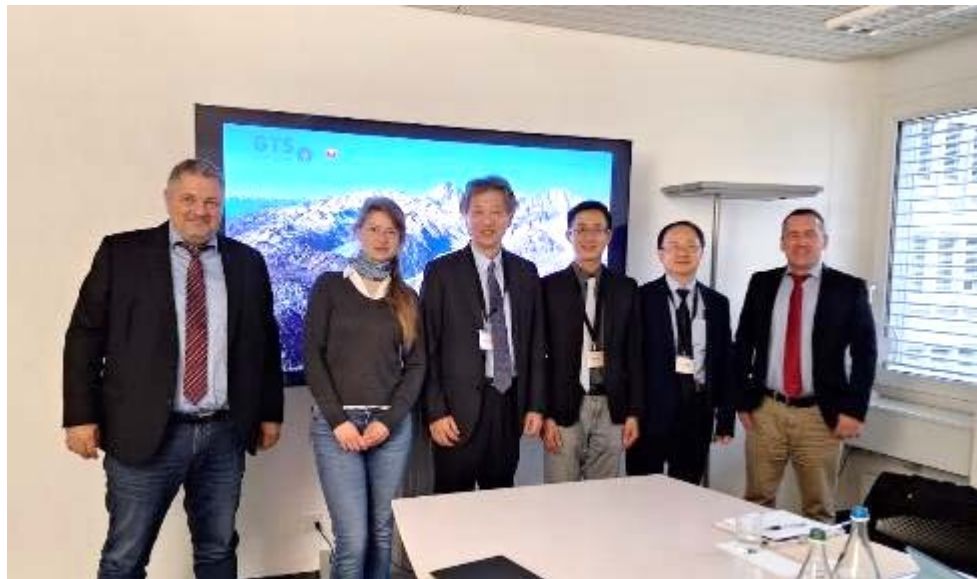


圖 15：台電公司參訪人員與 Nagra 代表於會議中合影

在本次參訪技術交流會議上，先由我方就臺灣的「放射性廢棄物最終處置以及核能電廠除役現況」進行簡報說明，Nagra 三位專家亦分別就「瑞士放射性廢棄物最終處置計畫執行現況」、「瑞士放射性廢棄物管理」以及「AMAC 技術發展與應用實例」進行簡報說明，重點摘要如下：

1. 瑞士放射性廢棄物最終處置計畫執行現況：經過長達 14 年的選址過程，Nagra 於 2022 年 9 月提出以瑞士北方的 Nördlich Lägern 作為高、低放射性廢棄物共同的最終處置之建議場址(圖 16)，選址過程共分以下 4 階段(圖 17):
 - (1) 第一階段 (2008 年~2011 年)：選出 6 個潛在場址並進行下一階段的地質調查。
 - (2) 第二階段 (2015 年~2018 年)：從 6 個地點中選出 2 個候選場址：Nagra 提出 Zürich Nordost 及 Jura Ost 繼續進一步調查，唯 2016 年時，瑞士核能安全管制機關 ENSI(Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate)提出 Nördlich Lägern 亦加入候選場址，聯邦議會最終於 2018 年決定同意上述三個候選場址進入第三階段調查。
 - (3) 第三階段 (2018 年~2022 年)：Nagra 經調查評估後，作出三個候選場址均能建造安全的最終處置場的結論，但是 Nördlich Lägern 場址的母岩(Opalinus Clay)具有最佳的天然地質障蔽能力與穩定性，並提供處置場設計較高的彈性，因此決定以 Nördlich Lägern 作為建議候選場址送交聯邦議會審查。
 - (4) 最終階段(2024 年至 2031 年)：Nagra 規劃於明(2024)年提交建造執照申請送交聯邦議會，聯邦議會將於 2029 年作出決定，並於 2030 年送國會辦理公投，2031 年決定最終處置場的法定場址。

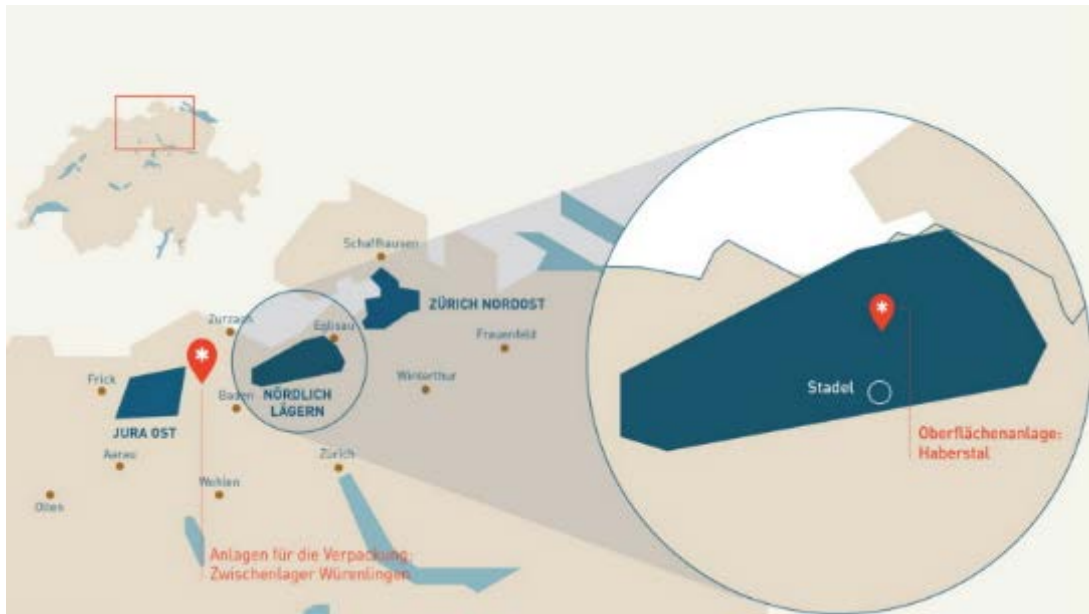


圖 16：Nördlich Lägern 建議場址位置

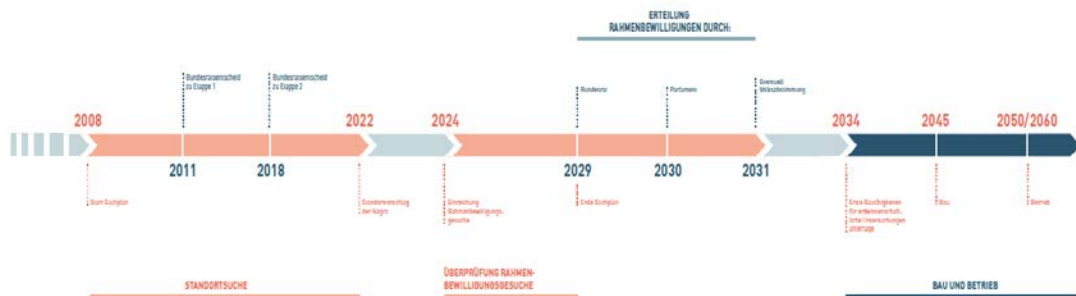


圖 17：瑞士放射性廢棄物最終處置計畫時程

2. 瑞士放射性廢棄物管理

- (1) 瑞士放射性廢棄物管理法規架構簡明，主要以「核能法及相關條例 (Nuclear Energy Law & Ordinance)」以及「輻射防護法及相關條例 (Radiation Protection Law & Ordinance)」作為最高位階的母法，核能管制機關 ENSI 必須依照輻射防護法制訂管制施行導則(Guidelines)，例如：ENSI B05 即是放射性廢棄物處理與包裝型式之規定。而 Nagra 的主要工作之一，就是代表核能電廠營運業者針對放射性廢棄物管理擬定統一的行政程序與允收標準(廢棄物包件型式、貯存及處置容器、前期處理標準等...)，並於獲得核電業者同意後，代表業者與管制機關協商，就專業技術與科學證據進行討論，研訂可供核能設施

遵行的方案，比如放射性廢棄物可以經除污量測後進行外釋，目前瑞士法規接受無限制性外釋(**free release**，亦即 **clearance**)，與我國運轉期間的外釋及除役期間的離廠量測方案相同，放射性廢棄物經除污後量測符合標準，即可自由釋出至環境社會，亦無須溶融稀釋。

- (2) **Nagra** 建立放射性廢棄物資料庫(**ISRAM**)，儲存瑞士全境的放射性廢棄物特性資料，由 **Nagra** 規劃設計統一格式的表單，提供給各個核能電廠與設施填表申報，以利掌握所有核能設施之放射性廢棄物總量，同時避免發生不同單位間廢棄物登錄申報格式不一致的問題。

3. AMAC 技術發展與應用實例

- (1) **AMAC** 為一項 **Nagra** 專為深入了解核能電廠停機後，反應爐各項組件與建物的中子流(**neutron flux**)分佈與活化程度所開發的技術，可供電廠進行除役拆除規劃、切割策略選擇及廢棄物容器與數量評估時的依據。
- (2) **AMAC** 技術之處理步驟(圖 18)：取得電廠技術資料、利用 **MCNP** 建立電廠中子流分佈 3D 立體圖譜、組件活化分析、協助除役切割與廢棄物裝填規劃。
- (3) **AMAC** 為一項自動化整合 **MCNP**、**ADVANTG**、**ORINGEN(SCALE)** & **LAVA** 等程式(圖 19)，並可將活化分析結果優化，並且以 3D 圖譜顯示的技術。
- (4) 以 **AMAC Data Tools** 進行有效率的管理及分析，再以體素(**voxel**)作為單位，將單一組件利用 10 萬至 1000 萬個體素依所含約 250 種以上的不同核種的比例因數(**nuclide vector**) 量化標示，並且建立中子活化分佈的 3D 立體模型(圖 20)，再利用一種名為「**ALGOPACK**」的模型，配合考量不同容器的活度限值、最大盛裝容積、重量限制等條件(圖 21 與圖 22)，搭配資料庫使用可自動擇選適用盛裝容器並且計算出的不同廢棄物盛裝容器的需用數量及配比(圖 23)。
- (5) **Nagra** 除已將此技術應用於瑞士各核電廠外，亦有和韓國等國家進行合作，進行分析應用計算之案例。

Overview of steps for an NPP project as well as the sequence of nuclear and in-house codes being used.

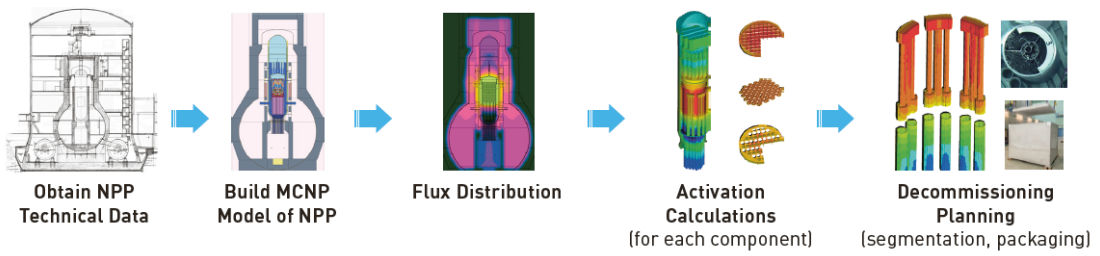


圖 18：AMAC 技術之處理步驟

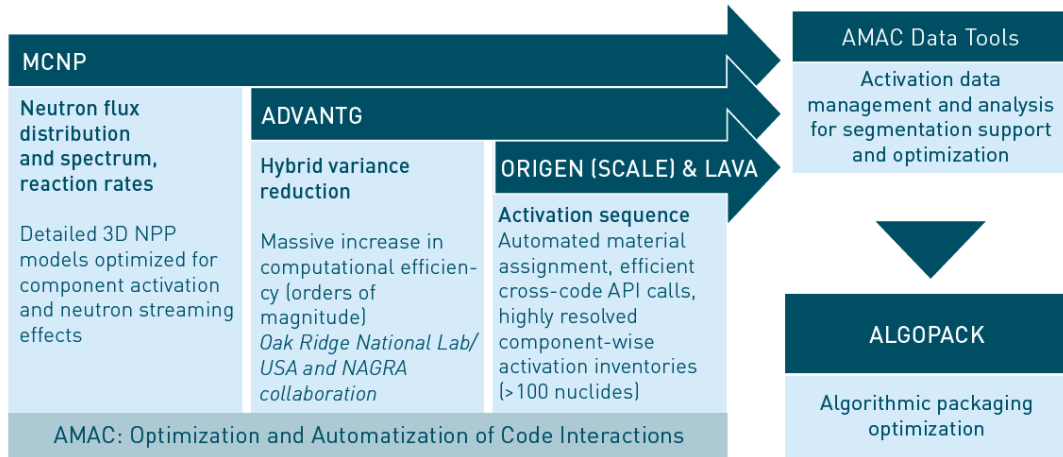


圖 19：AMAC 方法所使用的程式與功能說明

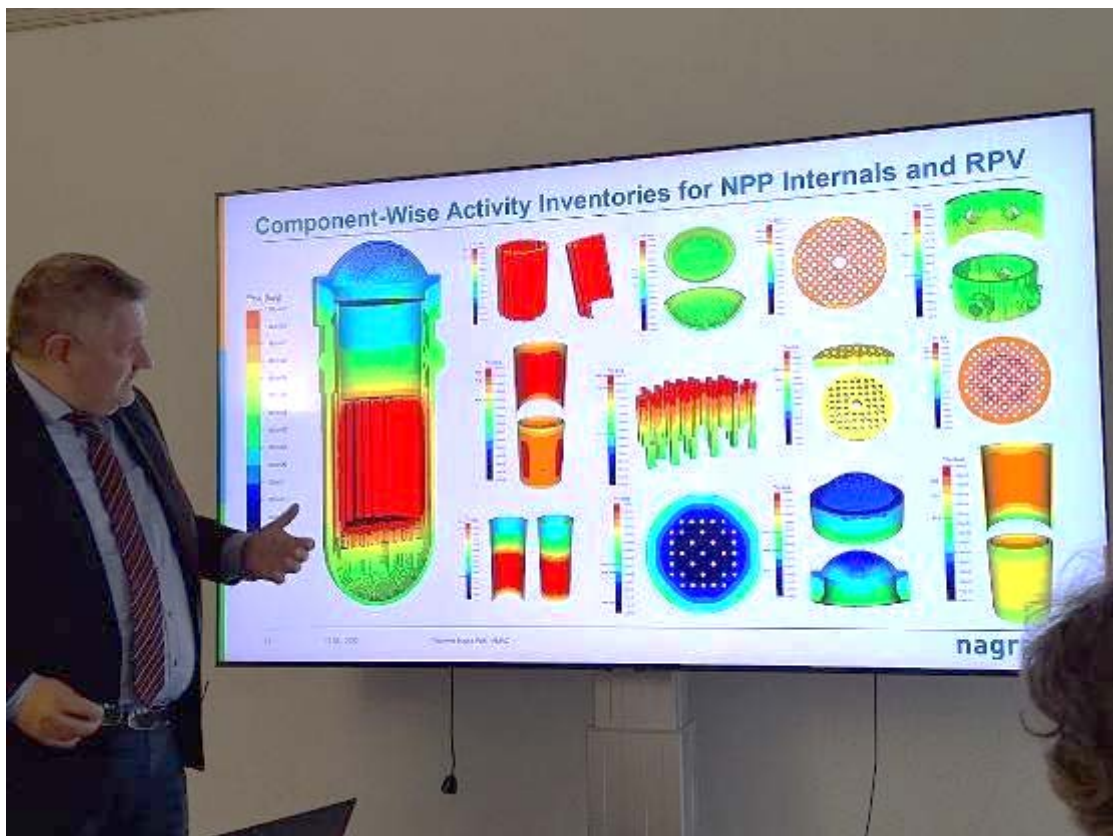


圖 20：RPV 及內部組件之中子活化分佈 3D 立體模型

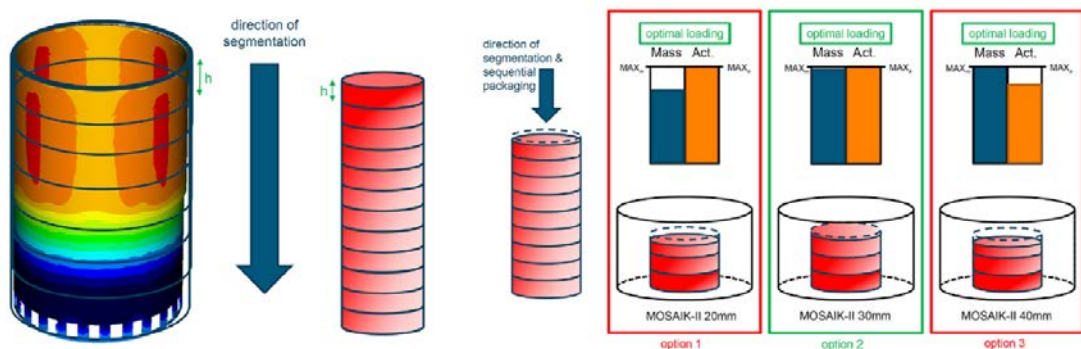


Fig. 19. Sequential order of packaging and evaluation of different waste container options in ALGOPACK.

圖 211：ALGOPACK 評估適用廢棄物盛裝容器原理

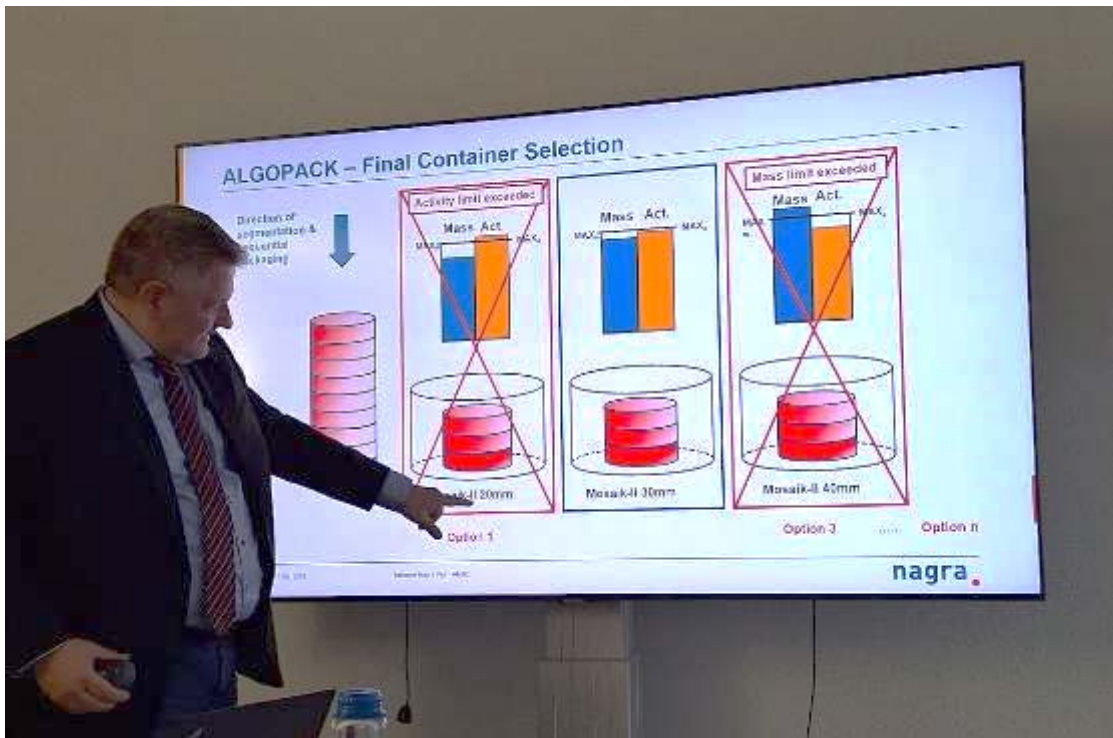


圖 222：ALGOPACK 依據活度與重量篩選容器之邏輯

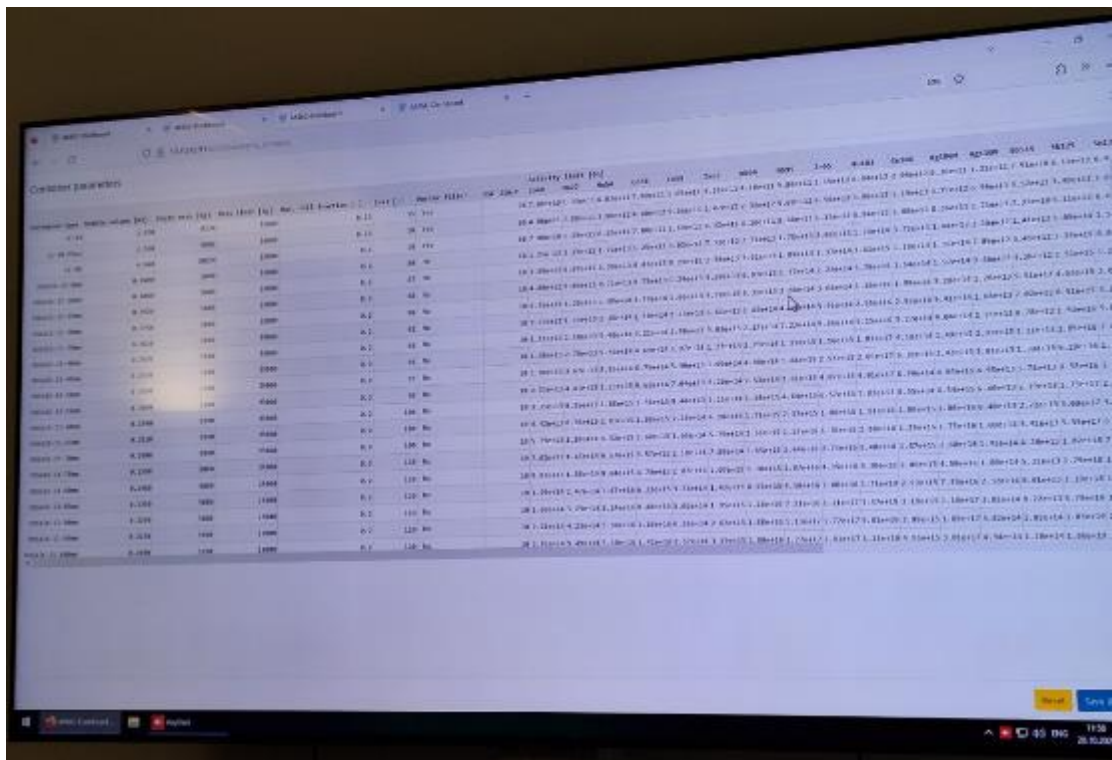


圖 233：ALGOPACK 可配合資料庫分析不同容器廢棄物盛裝結果

三、 瑞士核能協會 (Swissnuclear)

Swissnuclear 是由瑞士四間核電業者(Axpo Power AG、BKW Energie AG、Kernkraftwerk Leibstadt AG 和 Kernkraftwerk Gösgen-Däniken AG) 投資成立的協會，代表前述業者就核電相關議題(政治、公眾溝通、廢棄物管理、知識交流、經驗傳承、研究教育、國際合作)與政府、民眾以及管制機關溝通，致力優化改良核能電廠的內外部條件，以利核電廠於效期內之安全營運。

本次參訪 Swissnuclear 以及後述的 Zwiilag 集中式中期貯存設施，係透過駐瑞士台北文化經濟代表團協助安排連繫，並與本公司人員共同前往參訪，Swissnuclear 協會由總經理、電廠支援部門經理等代表接待(圖 24)，並與我方召開交流會議，簡報介紹 Swissnuclear 的位務以及重大業務辦理現況，並就雙方核能發展與後端現況進行深入討論。



圖 244：Swissnuclear 協會代表與駐瑞士台北代表處官員、台電參訪人員合影

總經理簡報說明瑞士核電現況與展望、電廠長期營運與績效、放射性廢棄物處置策略、後端基金使用情形，由於 Swissnuclear 主要任務之一，便是協助核電業者對政府提出有關能源政策以及後端基金重估的規劃建議，因此總經理特別介紹 Swissnuclear 對於瑞士未來能源規劃的研發成果以及後端基金之組成與運用現況。

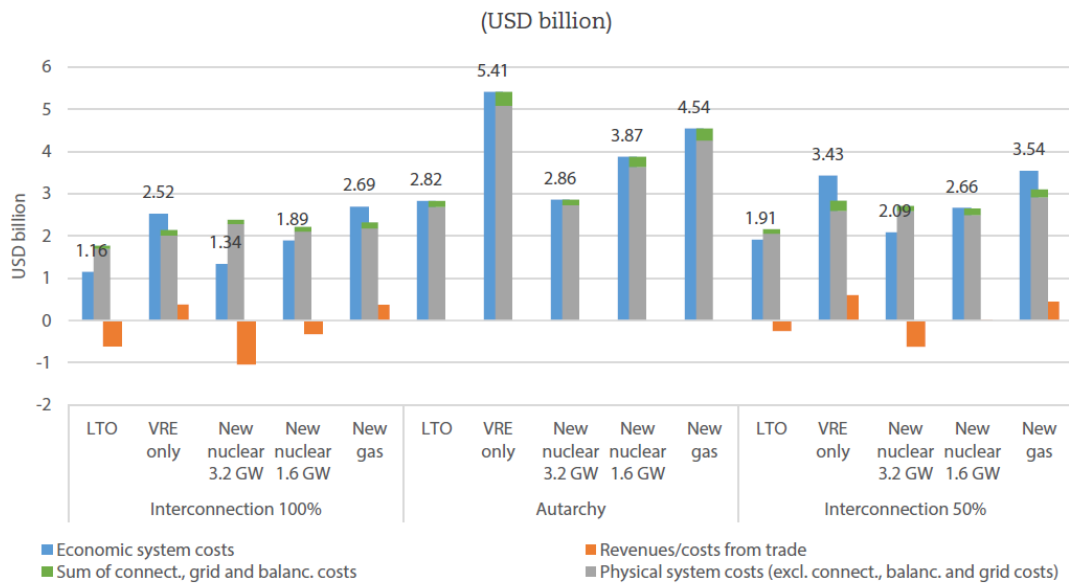
1. 瑞士未來能源規劃的研發成果：

- (1) 依據瑞士政府期望於 2050 年達成淨零碳排(net zero carbon emission)之目標，Swissnuclear 協會參考不同機構與學術期刊(NEA、CLI、Fuchs et al、Panos et al)相關研究，評估以 5 種不同的電力來源與配比進行模擬，可達到 2050 年淨零碳排的目標：
(a)LTO (Long-Term Operation)：既有核電持續運轉(3 座既有核電廠發電量為 2.2GW)、
(b)VRE (variable renewable energy) only：僅用再生能源發電且不再使用核電(90%太陽光電、10%其他再生能源)、
(c)New nuclear 3.2GW：新建 2 部第三代或以上的核電機組(預估可提供 3.2GW)、
(d) New nuclear 1.6 GW：新建 1 部第三代以上的核電機組(預估可提供 1.6GW)、
(e)New gas：使用 2GW 燃汽機組，但必須加計碳稅成本。
- (2) 再以三種假設情境：1. 維持連結既有國外電網，進出口電力(100% Interconnection)、2. 電力自給，不連接國外電網(Autarchy)、3. 進出口電量減低至原來的一半(50% Interconnection)，並且利用前述 5 種電力來源與配比建構電力系統與成本估算模型(NEA POSY models)，系統成本評估結果如圖 25。
- (3) 依據圖 25 顯示：組合有再生能源(水力發電)、維持既有核電運轉與外電進出口的能源配比結構，對於瑞士達成 2050 年淨零碳排成本最低亦最符合經濟效益。
- (4) 對於瑞士而言，長期仰賴核電與水力發電作為安全穩固的低碳電力來源，尤其是大量連結國外電網供輸電，足以提供水力發電不夠穩定時的安全彈性緩衝餘裕，但是亦有缺電時無法從鄰近國家進口電力或是購買外電成本驟升的風險。
- (5) Swissnuclear 代表說明臺灣如要達成淨零碳排的目標，在無連結對外

電網的情況下，較相近情境是完全電力自給(Autarchy)的模型可供參考。

2. 後端基金使用情形與研究

- (1) 瑞士依法設置成立後端基金，分為 1984 年成立的除役基金(Decommissioning fund)提供核能設施除役需用資金，以及 2002 年成立的處置基金(Disposal fund)，資金來源由核電業者於核能發電期間持續提撥，聯邦政府並設置委員會管轄。
- (2) 瑞士除役基金與處置基金每 5 年依未來費用考量進行重估，Swissnuclear 自 1994 年即開始協助核電業者評估基金需用數額，並提供相關研究，聯邦議會依據《除役和廢棄物處置基金條例》(Decommissioning and Waste Disposal Fund Ordinance)與獲准的處置計畫，進行基金重估數額審核。
- (3) 依 2021 年基金重估結果(圖 26)，瑞士預計單獨建造一個高低放射性廢棄物共用最終處置場，預估所需費用約為 110 億瑞士法郎，預估全國核能設施除役總經費約為 37 億瑞士法郎。



Note: Economic system costs equal physical system costs minus trade revenues plus sum of connection, grid and balancing costs. LTO = long-term operation; VRE = variable renewable energy.

圖 255：瑞士淨零碳排的電力結構本分析(來源：Swissnuclear)

四、 放射性廢棄物集中式貯存設施 (Zwilag)

瑞士 4 間核能電廠(Kernkraftwerk Mühleberg、Kernkraftwerk Gösgen、Kernkraftwerk Leibstadt、Kernkraftwerk Beznau)的經營者於 1990 年初期共同合資成立 Zwilag 公司，負責興建並營運集中式貯存設施，建置 Zwilag 集中式貯存設施的主要目的為存放瑞士境內的放射性廢棄物，瑞士聯邦政府於 1996 年 8 月核准興建 Zwilag，並於 2001 年開始接收及採乾式貯存方式存放用過核子燃料與其它各類放射性廢棄物，來源包含：核能電廠的用過核燃料、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。

本次參訪由 Zwilag 執行長及運轉經理負責接待我方人員(圖 27)，兩位除在參訪過程詳細介紹 Zwilag 貯存設施廠區佈置與各設施功能(圖 28、圖 29)之外，並帶領我方參訪人員參觀電漿廠(圖 30)、高放射性廢棄物貯存設施、中低放射性廢棄物貯存設施以及廢棄物除污工作間(γ -box)等處，並不時於導覽中回復我方提問。



圖 266：Zwilag 代表與駐瑞士台北代表處官員、台電公司參訪人員合影



圖 27：瑞士 ZWILAG 集中式貯存設施廠區空照圖 (來源:Zwilag)



圖 27：瑞士 ZWILAG 集中式貯存設施示意圖 (來源:Zwilag)



圖 29：瑞士 ZWILAG 電漿熔融與玻璃固化設備

因為本次參訪之目的側重於放射性廢棄物除污、減容以及相關管理，以利用作為核一廠放射性廢棄物處理區建置與執行除役放射性廢棄物管理作業時的參考，因此特請執行長加以說明 Zwilag 電漿廠的運轉方式與減容效能，茲摘要如下：

1. 有別於一般使用焚化方式處理放射性廢棄物，Zwilag 選擇用電漿熔融方式減容，為全球首例，電漿熔爐構造如圖 31，放射性廢棄物在電漿爐中，被高溫電弧分解(最高溫度可達 $20,000^{\circ}\text{C}$)，幾乎可將其中所有的有機物物質熱解分裂熔融成液態，再注入玻璃固化材料(vitrification medium)與殘餘廢棄物混合，常溫下的玻璃固化材料型態如圖 32，俟攪拌均勻與適當降溫後於模具冷卻固化後，再裝入處置容器。
2. 可使用電漿熔融減容之廢棄物包含：玻璃、木材、紡織品、塑膠、PVC、紙張、橡膠、混凝土、樹脂、泥漿、鋼、銅、黃銅、鋁、鉛、剛玉(corundum)等物料。
3. 依據 Zwilag 的運轉經驗，初始低放射性廢棄物經電漿熔融減容處理後可減至原有體積的 20%或更低，換言之，減容比高達 80%以上。

4. 電漿廠每批次處理約 20 至 25 初始廢料桶(圖 33)，每桶體積約 200 公升，經熔融與玻璃固化後，以 4~5 只處置容器盛裝(圖 34)，體積亦為 200 公升。
5. 雖然電漿熔融無法降低放射性廢物的活度，但是可以有效減少放射性廢棄物的體積，以節省最終處置的費用，此外，透過玻璃固化亦可讓殘餘廢棄物的物理性質與化學性穩定，使其更適合中期貯存或最終處置，最終處置桶內容物剖面構造如圖 35。

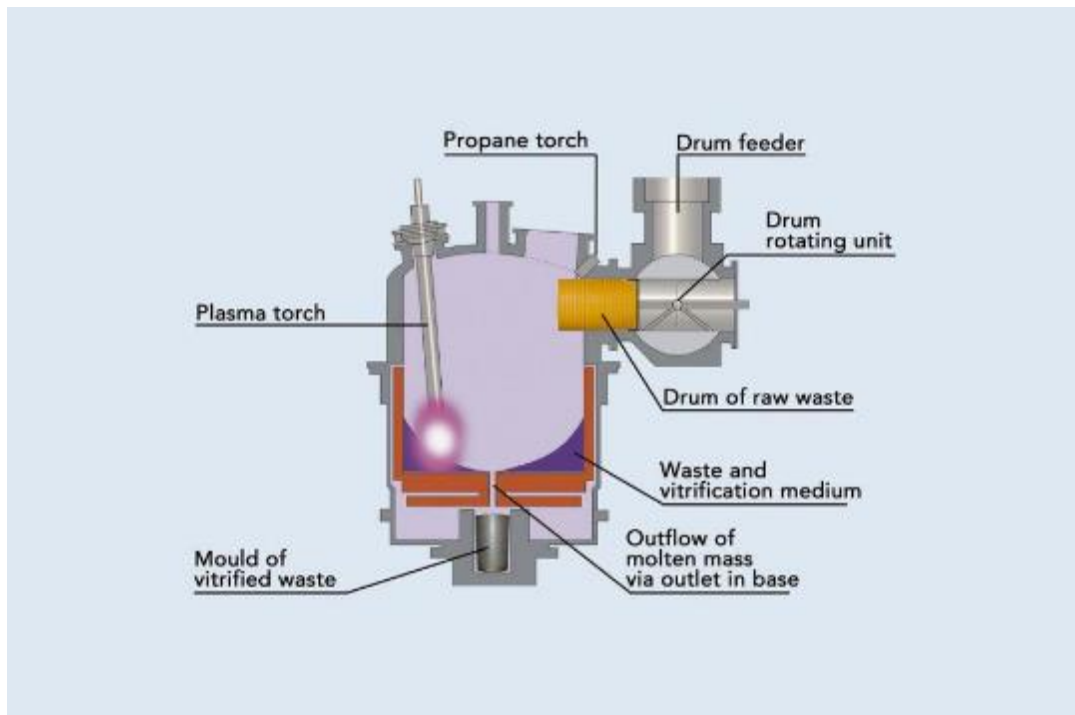


圖 30：電漿熔爐構造



圖 31：常溫狀態下的玻璃固化材料



圖 28：初始廢料桶(熔融前)



圖 29：瑞士低放廢棄物貯存處置容器



圖 30：最終處置桶內容物剖面構造

肆 心得

此次出國主要參訪瑞士除役電廠 KKM、瑞士核能協會 swissnuclear、瑞士放射性廢棄物暫時(interim)貯存設施 Zwilag 及瑞士放射性廢棄物處置專責機構 NAGRA，各相關機構的參訪獲益良多，參訪心得如下：

- 一、現行核安會要求核一廠拆除計畫都要報會核定，預期未來執行上會有困難，核一廠一貫主張應採通案方式辦理，經參訪 KKM 電廠僅 RPV 及內部組件切割、生物屏蔽牆拆除、拆除 Logistics 方案、輻射防護方案需送管制機關審核，其餘拆除計畫皆不需陳報。後續會持續與核安會溝通，以免因繁雜管制程序影響除役時程。
- 二、參訪瑞士除役電廠 KKM 後，獲得相當多的實務資訊，KKM 電廠為瑞士第一座除役電廠，其反應爐型式亦為 BWR-4，與核一廠同型，故該電廠在除役規劃、執行等均與核一廠相近，參訪後在核一廠的規劃及實務面臨的議題上均獲得驗證及實務經驗的汲取，對後續除役工作影相當助益，舉例如下：
 - (一) 除污經驗 1：KKM 電廠沒有執行系統化學除污，理由是藉由核種自然衰變即可降低工作劑量。此規劃與核一廠相同，目前也已向核安會申請不執行系統化學除污，此資訊提供另一佐證資料。
 - (二) 除污經驗 2：KKM 電廠針對污染較高之設備，除污分成兩段式，第一段是用高壓水濕式除污，第二段用乾式噴砂。其原因為第一段濕式先除去大量污染物及油脂，避免乾式噴砂機內部及砂粒被重度污染或油脂黏著，之後再以乾式噴砂除污到達可離廠標準。此資訊的取得，是很好的經驗案例，核一廠原無此概念，目前正參考 KKM 資訊，核一廠依此方向修訂廢棄物處理設施(WMA)規劃。
 - (三) 外釋離廠量測作法：KKM 電廠發電機不必切割，直接整件移出後以單槍式純鍺偵檢器量測符合標準直接離廠。
 - (四) 設備切割作法：KKM 電廠除役作業的執行方式與核一廠相近，例如：在拆除切割規劃方面，大型或專業性高之切割，如反應器切割是整體發包執行，其餘則是自己員工規劃執行。
- 三、瑞士有建置集中式貯存設施(Zwilag)，各核電廠的放射性廢棄物除存放在各自的貯存設施外(ex. KKB 電廠 Zwibez 貯存設施、KKG 電廠濕式貯存方式)，其餘廢棄物均存放在 Zwilag 由專責機構進行管理，且設施內也建置廢棄物分類、

壓實、廢液處理和固化處理，及新型電漿融熔設施，廢棄物經處理後減容並可作為最終處置存放，此種廢棄物集中管理方式並設置處理設施以供最終處置的規劃值得我國借鏡參考。

- 四、經由本次參訪得知 **Nagra** 可以代表核電業者與電廠與瑞士管制機關 **ENSI** 協商制訂合理的管制標準，提供科學證據及安全分析結論協助 **ENSI** 研訂統一的廢棄物包件型式、貯存及處置容器、前期處理標準等，供全國核能設施遵循，以達到維護核能安全與符合經濟效益之目的，瑞士此一交由專業研究機構負責安全評估，並且能代表業者與管制機關溝通管制標準的方式，對於行政效能與成本管控有一定的效益，值得思考。

伍 建議

- 一、 瑞士 KKM 電廠為瑞士第一座除役電廠，其反應爐型式為 BWR-4，與核一廠同型，自 2020 年開始除役，目前廠內 418 束燃料束已全數移出至 Zwiilag 集中式貯存場，完成該廠除役規劃第一階段。陸續完成汽機、發電機、主蒸管路(MSL)及液壓池(Torus)的拆解，因此，KKM 電廠在設備拆除切割、廢棄物流管理、WMA 建置/除污經驗及離廠外釋量測經驗等均累積相當實務經驗，故建議除持續與 KKM 電廠交流外，或可思考與 KKM 電廠建立長期合作模式，邀請該廠專家到核一廠進行技術交流訪問，可在花費有限之下獲得更大之成效。
- 二、 因為 Nagra 已有使用 AMAC 技術協助 Mühleberg 核電廠及韓國進行反應器與內部組件中子活化分析等數個實際案例，以及利用 ALGOPACK 評估最適化的除役廢棄盛裝容器種類與數量的實例，復因核一廠與 Mühleberg 電廠屬同型反應器，爰建議可以考量藉由國際合作的方式，協助國內除役電廠進行中子活化分析以及除役低放廢棄物容器數量優化評估，作為除役電廠進行反應器與內部組件切割與拆除之前置作業參考資料。