

出國報告（出國類別：開會）

## 台、德低放射性廢棄物最終處置國際會議(含技術參訪)

服務機關：台灣電力公司核能後端營運處

姓名職稱：康哲誠 副處長

黃秉修 組長

許庭瑄 專員 陳智隆 專員

派赴國家/地區：德國

出國期間：108年5月13日~108年5月22日

報告日期：108年6月25日

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：台、德低放射性廢棄物最終處置國際會議(含技術參訪)

頁數 28 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力公司/ 陳德隆/ (02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

台灣電力公司/ 康哲誠/ (02)2366-7210#2202

台灣電力公司/ 黃秉修/ (02)2366-7210#2323

台灣電力公司/ 許庭瑄/ (02)2366-7210#2335 陳智隆

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：108.5.13~108.5.22

派赴國家/地區：德國

報告日期：108 年 6 月 25 日

關鍵詞：低放射性廢棄物最終處置、中期貯存、核能後端營運

內容摘要：(二百至三百字)

德國原有 22 部核能機組，2011 年日本福島事故後採取非核家園政策，目前有 13 部核能機組進行除役，與台灣核能政策類似；2013 年起台、德就核能後端營運事務密切技術交流，本次應邀赴德國參加由德國 GNS (Gesellschaft für Nuklear-Service mbH) 公司主辦之「台、德低放射性廢棄物最終處置國際會議(含技術參訪)」，德國在核能電廠除役、用過核子燃料護箱，低放除容器以及低放射性廢棄物處置規劃皆有相當先進之技術，且俱備實際核能電廠除役廢棄物處理及包裝、製造用過核子燃料護箱與中/低放射性廢棄物處置設施運轉之經驗，故本次著重在核能後端營運、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。

## 目錄

壹、	目的.....	1
貳、	過程.....	2
參、	工作內容.....	3
一、	參與台、德低放射性廢棄物最終處置國際會議 .....	3
二、	技術交流會議暨參訪容器製造工廠 .....	9
三、	參訪 Konrad 德國低放最終處置場.....	16
四、	菲利普斯堡核能電廠 .....	23
肆、	心得與建議.....	26

## 圖目錄

圖 3.1.1	台、德低放射性廢棄物最終處置國際會議 .....	3
圖 3.1.2	GNS 公司股份組成示意圖 .....	4
圖 3.1.3	GNS 各類盛裝容器示意圖 .....	6
圖 3.1.4	本公司介紹台灣核能後端現況 .....	7
圖 3.1.5	會議進行討論情形 .....	7
圖 3.1.6	Roger Vallentin 介紹 WTI 公司 .....	8
圖 3.2.1	Siempelkamp 輔助容器 .....	9
圖 3.2.2	米爾海姆討論會議情形 .....	10
圖 3.2.3	Siempelkamp 米爾海姆工廠安全宣導 .....	11
圖 3.2.4	康哲誠副處長致贈感謝禮品 .....	11
圖 3.2.5	CASTOR® 金屬護箱參訪合照 .....	12
圖 3.2.6	EWB 技術討論會議 .....	13
圖 3.2.7	康副處長致贈 EWB 禮品 .....	15
圖 3.3.1	Konrad 處置場地地表豎井相對位置圖 .....	17
圖 3.3.2	Konrad 處置坑道現況 .....	17
圖 3.3.3	Konrad 處置坑道配置圖 .....	18
圖 3.3.4	Konrad 1 豎井圖 .....	20
圖 3.3.5	坑道內合影 .....	20
圖 3.3.6	紅外線監測設備 .....	21
圖 3.3.7	參訪前安全解說 .....	22
圖 3.3.8	參訪人員皆須配備完整安全套裝 .....	22
圖 3.4.1	Philippsburg 用過核子燃料乾式貯存設施外觀 .....	24
圖 3.4.2	Philippsburg 核電廠技術討論會議 .....	25

## 壹、目的

台灣發展核能發電事業已逾 40 年，隨著運轉執照期限陸續終止，及現況非核家園政策下，核能一廠 1 號機組已於 2018 年 12 月 5 日正式進入除役期程，代表台灣核能電廠正逐步邁入除役階段。首要之務為解決燃料池滿載，須將用過核子燃料從核子反應爐或燃料池中移至乾式貯存系統，以利執行後續除役作業，接著須完整規劃放射性廢棄物之最終處置作業。德國在核能電廠除役、用過核子燃料護箱，以及低放射性廢棄物處置規劃已有相當先進之技術，具有實際拆除核能電廠、用過核子燃料護箱製造與低放射性廢棄物處置設施運轉之經驗，故本次國際會議及和相關單位的交流討論著重於核能後端營運、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。

為強化及精實本處目前辦理「低放射性廢棄物最終處置技術發展精進案」與「集中式中期貯存」技術服務案之管理與技術能力，此次研討會議交流討論機構與技術參訪設施及其簡介如下：

### 一、德國核能服務公司(GNS)

交流台灣與德國核能後端推動概況，以及德國核能電廠爐心活化評估。

### 二、盛裝容器製造工廠

#### (一) 米爾海姆(Mülheim)-Siempelkamp

參訪德國用過核子燃料金屬護箱製造流程。

#### (二) Eisenwerk Bassum(EWB)

參訪低放與中放盛裝容器之類型、製作方式，以及需考量的項目。

### 三、Konrad 處置場技術參訪

參訪地底深層坑道式處置設施，以及交流坑道開挖之經驗。

### 四、菲利普斯堡(Philippsburg)核能電廠

交流菲利普斯堡核能電廠之除役期程規劃考量，以及參訪室內用過核子燃料金屬護箱貯存設施。

德國原有 22 部核能機組，因 2011 年日本福島事故後採取非核家園政策，目前有 13 部核能機組進行除役，與台灣核能政策十分類似；因此，台灣目前需汲取大量國外成功經驗及技術，效法及改良後應用於國內放射性廢棄物最終處置之議題。

## 貳、過程

自 108 年 5 月 13 日出發，迄 5 月 22 日返國(共計 10 日)，停留德國，詳細行程如下：

時間	地點	工作內容
5 月 13-14 日 (一)-(二)	台灣 至德國法蘭克福-杜塞爾 多夫	去程
5 月 15 日(三)	德國杜塞爾多夫	參加「台、德低放射性廢棄物最終 處置國際會議(含技術參訪)」
5 月 16 日(四)	德國杜塞爾多夫	參加「台、德低放射性廢棄物最終 處置國際會議(含技術參訪)」及參訪 容器加工裝配工廠
5 月 17 日(五)	德國薩爾茨吉特	參訪 Konrad 低放最終處置場
5 月 18 日(六)	漢諾威 至法蘭克福	路程移動
5 月 19 日(日)	法蘭克福	會議資料整理與準備參訪資料
5 月 20 日(一)	菲利普斯堡核能電廠	技術參訪德國 EnBW 公司菲利普斯 堡核能電廠之除役中放射性廢棄物 處理及貯存設施
5 月 21-22 日 (二)-(三)	德國至台灣	返程

## 參、 工作內容

### 一、 參與台、德低放射性廢棄物最終處置國際會議

本次會議由 GNS 公司舉辦，由 Dr. Hannes Wimmer (CEO)主持，與會人員有 Dr. Jürgen Skrzypek、Dr. Linus Bettermann、Dr. Stefan Fopp、Mr. Dirk Becher、Mr. Jörg Viermann、Mr. David Bergandt、Mr. Jan Klingen 以及 WTI (Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH) 公司的 Roger Vallentin。由於台灣和德國目前非核家園政策十分相似，本次會議就雙方放射性廢棄物最終處置及貯存、放射性廢棄物容器選擇等議題進行交流討論(圖 3.1.1)。



圖 3.1.1 台、德低放射性廢棄物最終處置國際會議

GNS 原名為 GNT 核能運輸公司(Gesellschaft für Nukleartransporte mbH)，於 1974 年成立，總部位於德國杜塞爾多夫行政區的埃森市(Essen)，1977 年改名為核能服務公司，係由德國四家電力公司 Preussen Elektra GmbH、RWE Nuclear GmbH、SNE Südwestdeutsche Nuklear-Entsorgungsgesellschaft mbH、Vattenfall Europe Nuclear Energy GmbH 合資成立，如圖 3.1.2，並於同年發表第 1 個 MOSAIK®中階放射性廢棄物盛裝容器，隨即於隔年 1978 年發表第 1 個 CASTOR®用過燃料貯存/運輸兩用型護箱，目前主要營業項目為協助管理德國核能電廠營運及除役所產生的放射性廢棄物。

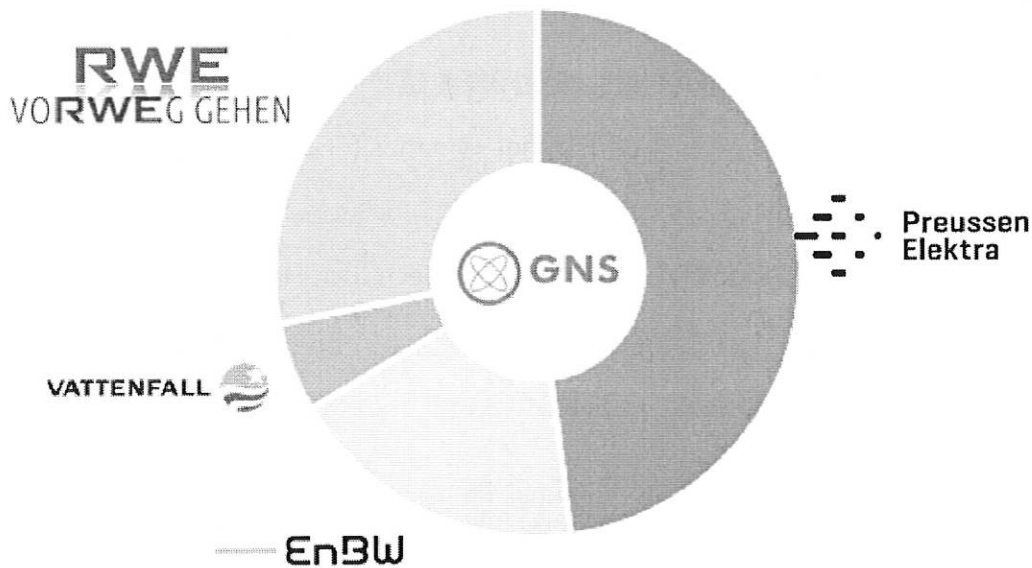


圖 3.1.2 GNS 公司股份組成示意圖

MOSAIK<sup>®</sup>盛裝容器為鑄鐵製成的中階放射性廢棄物盛裝容器，可用於裝載核能設施運轉與停機除役之廢棄物，例如爐心組件、處理過的高輻射比活度離子交換樹脂，或是蒸發濃縮液。盛裝容器設計成可與廢棄物處理設備連結，因此廢棄物可直接在 MOSAIK<sup>®</sup>處理，同時可作為最終處置盛裝容器。為了裝載不同類型廢棄物，MOSAIK<sup>®</sup>設計多種內體積、壁厚或上蓋系統，而考量輻射屏蔽需求或廢棄物特性，容器內可插入鉛屏蔽與過濾系統，成為多功能性之盛裝容器。MOSAIK<sup>®</sup>設計作為運輸/貯存/處置容器，運輸部分依據需求，為乙(U)型運輸容器。

中階與低階放射性盛裝容器除了 MOSAIK<sup>®</sup>以外，尚開發混凝土夾層屏蔽容器(Cladded Concrete Shielding)、鑄鐵成形之 Yellow BoX<sup>®</sup>與碳鋼焊接之 SBoX<sup>®</sup>等。

#### (一) 混凝土夾層屏蔽容器

混凝土夾層屏蔽容器為符合 IP-2 包件規範之運輸與貯存容器，最大可裝載 1,500 kg 之乾性放射性廢棄物，圓柱形桶壁由內外鋼製套構成，中間的空隙夾層填充混凝土，而依照輻射屏蔽需求，可填充不同密度之混凝土，並且於表面塗上塗層以增加防鏽蝕功能。廢棄物可直接裝入混凝土夾層屏蔽容器中，或是作為重裝容器，直接將其他廢棄物桶裝入，容積為 200 公升至 400 公升。



## (二) GNS Yellow BoX®

GNS Yellow BoX®為鑄鐵製成的箱型盛裝容器，符合 IP-2 運輸容器規範，可用於裝載核能設施廢水處理系統產生之放射性廢棄物，因為這類廢棄物一般需較高屏蔽需求。在 Konrad 處置窖，GNS Yellow BoX®最大裝載重量為 1,600 kg，若用於其它目的使用則最大可裝載至 6,000 kg，總重依 Konrad 處置場接收標準，不得超過 20 公噸。

## (三) GNS SBoX®

GNS SBoX®可用於中期貯存與處置，可裝載核能設施產生之所有廢棄物類型，由焊接厚壁鋼板組成，容器空重為 16,500 kg，最大有效載重約為 8,500 kg。依據需求，GNS SBoX®上蓋可為圓形或矩形系統，與其它廢棄物處理設備相互連結。

對於高放射性廢棄物(High Level Waste, HLW)，CASTOR®與 CONSTOR®這 2 種金屬及水泥護箱型式，作為運輸與貯存 2 用型護箱，CASTOR®適用裝載高熱用過核子燃料，代表可裝載高燃耗或短冷卻時間之用過核子燃料；CONSTOR®則設計為裝載冷卻時間較長之用過核子燃料，水泥屏蔽可降低金屬護箱貯存成本。對於破損燃料棒，有設計特殊系統「箭袋系統(Quiver-System)」用於裝載破損燃料棒，使破損燃料可順利從燃料池中置入護箱。

### (一) CASTOR®護箱

CASTOR®護箱用於運輸與中期貯存用過核子燃料及再處理廢棄物，其技術原則如下：

1. 護箱提供良好的輻射屏蔽功能，避免人員受到輻射曝露。
2. 護箱設計雙重密封蓋，這項「雙重上蓋系統」可確保放射性核種可備安全的密封於護箱中。
3. 護箱內的燃料組件提籃可確保其散熱功能與維持燃料次臨界狀態。
4. 護箱設計為可承受嚴重的外部衝擊，例如運輸意外或火災。

CASTOR®護箱符合國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)之最高安全需求。

### (二) CONSTOR®護箱

CONSTOR®護箱為運輸與貯存用過核子燃料兩用護箱，護箱採用「三明治(Sandwich)組成方

式」構成壁厚，包含由細精粒鋼(Fine-Grained Steel)製成的內襯與外襯，再經由焊接後形成雙重密封，而在內襯與外襯間將填充「CONSTORIT」，CONSTORIT 為特殊重混凝土屏蔽。CONSTOR® 護箱可作為用過核子燃料中期貯存，結合減震器與重裝容器，CONSTOR®護箱設計符合 IAEA 乙(U)型包件設計。

前述各中階與低階放射性廢棄盛裝容器與用過核子燃料護箱示意如圖 3.1.3。

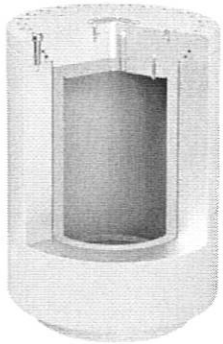

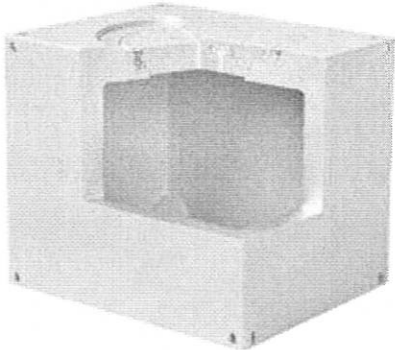
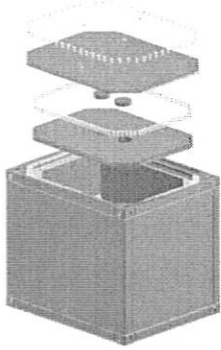
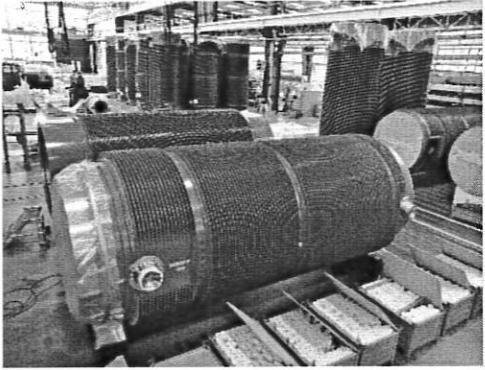
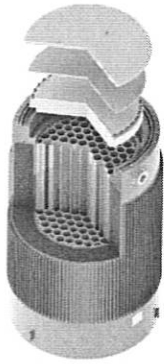
<p style="text-align: center;"><b>MOSAİK®</b></p> 	<p style="text-align: center;">混凝土夾層屏蔽容器</p> 
<p style="text-align: center;"><b>GNS Yellow BoX®</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>GNS SBoX®</b></p> 
<p style="text-align: center;"><b>CASTOR® 金屬護箱</b></p> 	<p style="text-align: center;"><b>CONSTOR® 水泥屏蔽護箱</b></p> 

圖 3.1.3 GNS 各類盛裝容器示意圖

資料來源：GNS (2019)

技術交流會議中，本公司介紹台灣核能後端現況，內容包含台灣目前電力發展政策、核能電廠除役規劃與期程、乾式貯存規劃，以及集中式貯存與低放處置規劃(圖 3.1.4 和圖 3.1.5)；完整介紹讓德國技術團隊了解台灣放射性廢棄物管理概況。



圖 3.1.4 本公司介紹台灣核能後端現況



圖 3.1.5 會議進行討論情形

德國由 WTI (Wissenschaftlich Technische Ingenieurberatung)公司 Mr. Roger Vallentin 介紹該公司業務範圍(圖 3.1.6)，其在核能領域具有超過 35 年的技術與經驗，主要執行以下相關業務：

- (一) 核能電廠的規劃與建造
- (二) 除役計畫
- (三) 執造申請的安全分析與文件
- (四) 廢棄物管理
- (五) 程式模擬計算，例如輻射屏蔽、臨界、熱計算，以及力學計算
- (六) 開發計算程序與計算方式



圖 3.1.6 Roger Vallentin 介紹 WTI 公司

本會議 WTI 主要介紹貯存場與處置場基本設計與細部設計、建造諮詢、爐心活化計算，以及多項廢棄物處置與貯存相關工作。

## 二、 技術交流會議暨參訪容器製造工廠

### (一) Siempelkamp 工廠

Siempelkamp 具有超過 130 年的歷史，為全世界核能電廠之設備產品與技術服務供應商之一，提供顧問諮詢、規劃、設計、執照申請協助、容器製造與訓練等服務。Siempelkamp 從 1970 年開始專門生產與加工放射性廢棄物盛裝容器，包含用過核子燃料運輸護箱與貯存護箱、低放射性廢棄物盛裝容器，以及其他輔助容器，對於放射性廢棄物容器製作已具有將近 50 年的經驗。用過核子燃料護箱部分，Siempelkamp CASTOR®護箱之製造工廠；中低放射性廢棄物盛裝容器為 MOSAIK®盛裝容器之製造工廠；而其他輔助容器為盛裝容器屏蔽強化容器，依照輻射屏蔽與盛裝容器尺寸需求，客製化設計所需之屏蔽厚度與尺寸，其設計概念上可將 4 個桶形容器作為 1 組單位(圖 3.2.1 左圖)，便於貯存與堆疊規劃，或是直接將桶形容器再外包裝一個屏蔽桶形容器(圖 3.2.1 右圖)，透過這些作法降低廢棄物盛裝容器表面劑量，達到職場工作人員輻射安全考量。

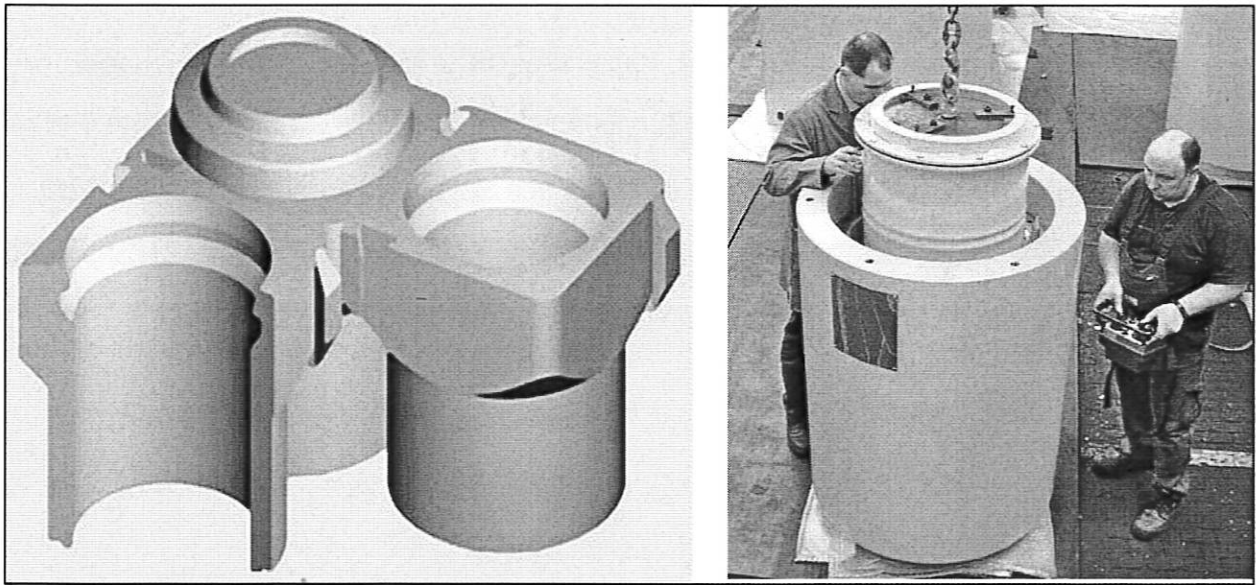


圖 3.2.1 Siempelkamp 輔助容器

本次參訪為 Siempelkamp 位在米爾海姆(Mülheim)的工廠，米爾海姆工廠主要為加工 CASTOR®金屬護箱，當日由 Dr. Hannes Wimmer、Dr. Jürgen Skrzyppek 和 Dr. Linus Bettermann 進行技術講解及製作程序解說(圖 3.2.2)。

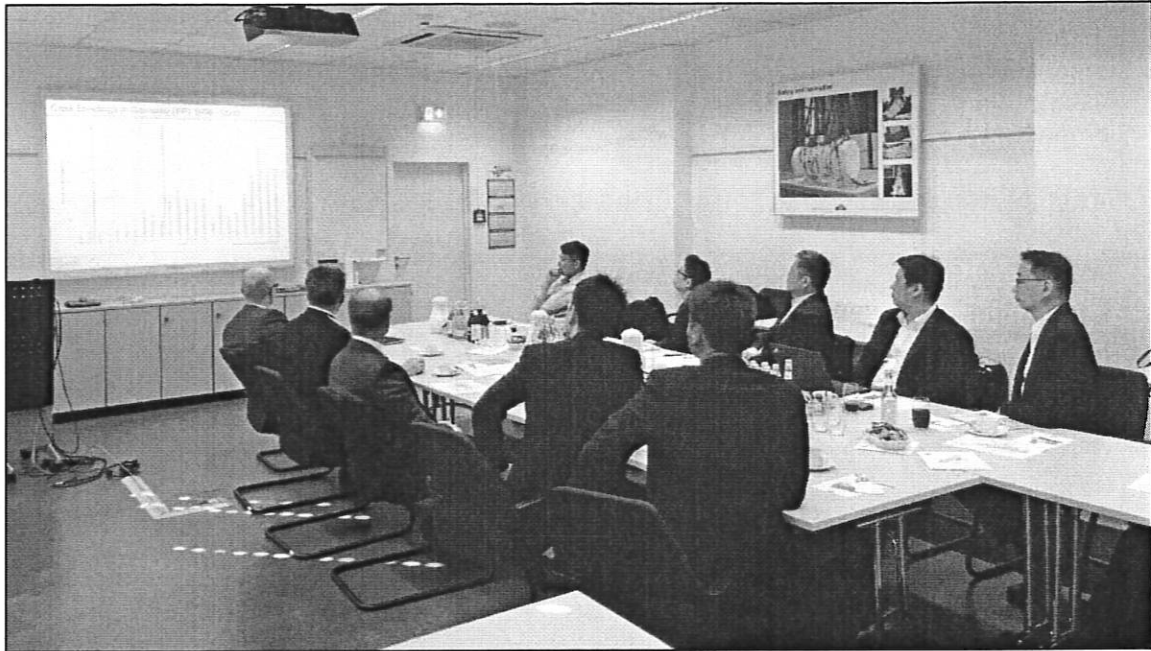


圖 3.2.2 米爾海姆討論會議情形

米爾海姆工廠目前一年可生產 80 個至 100 個 CASTOR® 金屬護箱，工廠內設有用過核子燃料裝載模擬訓練區，可供訂購金屬護箱之顧客在現場實際模擬操作未來要如何將用過核子燃料裝載至金屬護箱，並且提供裝載技術教學，確保顧客可正確且安全的執行用過核子燃料裝載。而工廠內設有小型博物館，闡述金屬護箱發展與經過各種測試的結果摘錄與樣品，例如火燒試驗、撞擊試驗，以及墜落試驗等，透過這些實體試驗證實金屬護箱的完整性與堅固性。

交流會議結束後，進入工廠前先進行安全解說及宣導(圖 3.2.3)，再進入工廠進行參訪。

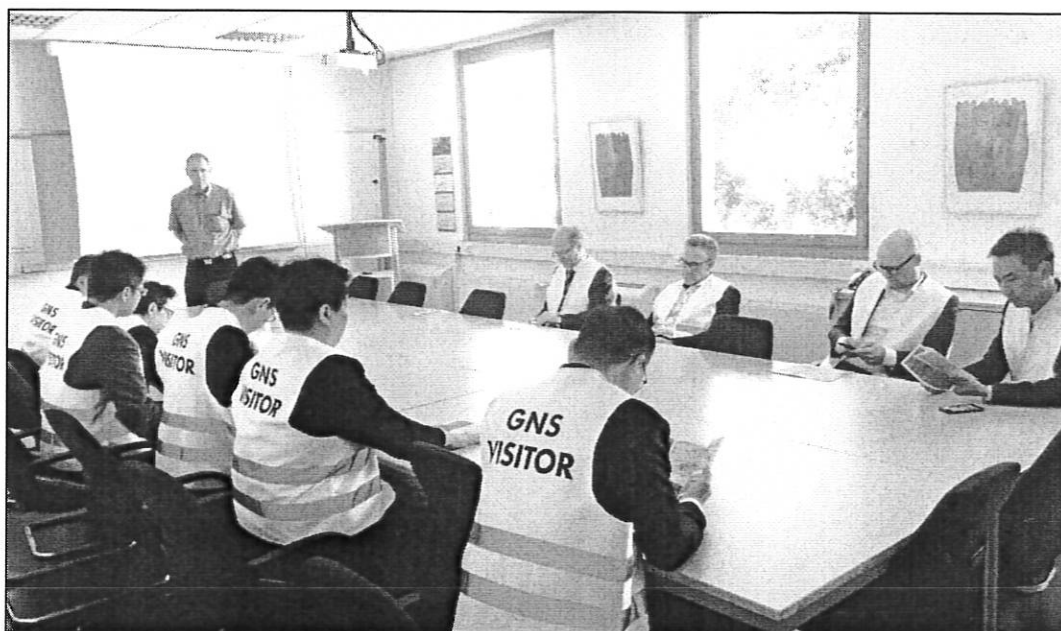


圖 3.2.3 Siempelkamp 米爾海姆工廠安全宣導

參訪結束後，由康哲誠副處長致贈 CEO Dr. Hannes Wimmer 及 Director Dr. Jürgen Skrzypek 禮品(圖 3.2.4)，感謝 Siempelkamp 米爾海姆工廠之技術人員帶領參訪團隊參觀金屬護箱製作程序與技術講解(圖 3.2.5)，為參訪交流紀錄照片。



圖 3.2.4 康哲誠副處長致贈感謝禮品



圖 3.2.5 CASTOR®金屬護箱參訪合照

## (二) EWB 除役盛裝容器製造工廠

Eisenwerk Bassum (EWB)為除役盛裝容器製造商，製作容器包含圓柱形廢棄物桶(200 公升至 580 公升)、鋼箱(1 型至 6 型)，以及客製化特殊容器，依據輻射屏蔽需求，廢棄物桶與鋼箱可依需求於內部增加屏蔽鋼板或鉛板，而鋼箱也可以裝填混凝土材料作為輻射屏蔽。容器在運輸規格上，符合 IP-2 甲型運輸容器。此外，EWB 也提供顧問服務與諮詢，幫助顧客釐清適合使用的盛裝容器類型、廢棄物裝載規劃、技術交流與廢棄物裝載訓練。

本次行程首先就技術交流進行會議討論(圖 3.2.6)，再進入工廠內實際參訪。





圖 3.2.6 EWB 技術討論會議

對於鋼箱內的混凝土材料密度，EWB 表示依照顧客的輻射屏蔽強度需求，可選擇  $1.5 \text{ g/cm}^3$ 、 $2.1 \text{ g/cm}^3$ 、 $2.3 \text{ g/cm}^3$  與  $3.5 \text{ g/cm}^3$  這幾種，屏蔽需求越高者選擇密度越高的混凝土材料。參訪過程中，針對以下幾項問題進行討論：

1. 反應爐內組件切割廢棄物之裝載提籃是否能重複使用

一般而言，反應器組件常採用水下切割方式，切割後的廢棄物將以盛裝容器專用提籃裝載，再一同放置於盛裝容器內。然而，廢棄物提籃不建議重複使用，其原因如下：

(1) 節省作業時間與經費

當選擇將提籃內的廢棄物「倒入」盛裝容器後，再重複使用提籃，過程將會增加作業時間，代表著將增加反應器拆除時間，而拆除時間增加代表所需的拆除作業費用將提升，同時倒入廢棄物的動作將增加作業的風險，因此不建議重複使用。

(2) 減少輻射劑量

影響輻射曝露的三大要件為時間、距離與屏蔽，因此作業時間增加代表著輻射劑量增加，因此建議不重複使用提籃以降低作業時間，進而減少工作人員輻射劑量。

### (3) 幫助重心確認

廢棄物裝載在提籃中，將有助於確認廢棄物裝載重心是否有偏移，倘若直接將廢棄物倒入盛裝容器中，將可能造成裝載重量不平均，導致盛裝容器重心偏移，進而增加盛裝容器吊掛作業的困難。

### 2. 盛裝容器屏蔽厚度需求與計算

EWB 表示若為單純的購買盛裝容器時，EWB 不會計算盛裝容器裝載廢棄物之屏蔽厚度需求，輻射屏蔽需求厚度需由顧客端自行評估，EWB 僅依照顧客訂單資料製作盛裝容器

### 3. 為何盛裝容器多以黃色外漆呈現

EWB 表示黃色有助於對比色的呈現，當有髒污留於盛裝容器表面時將較容易被發現。

### 4. 為何德國廢棄物盛裝容器重量偏低

依據德國 Konrad 處置場規定，Konrad 處置場最大接收重量為 20 噸，因此盛裝容器之設計容量較小，避免廢棄物裝載後超過 Konrad 處置場接受重量，而設計容量小亦有助於降低重心偏移的疑慮。

參訪結束後，由康副處長代表致贈禮品(圖 3.2.7)，感謝 EWB 管理者與技術人員帶領參訪團隊盛裝容器製作與技術講解。



圖 3.2.7 康副處長致贈 EWB 禮品

### 三、 參訪 Konrad 德國低放最終處置場

Konrad 處置場位於德國薩爾茨吉特(Salzgitter)區，原為廢棄鐵礦場，1976 年開始針對鐵礦場進行調查，發現鐵礦場母岩適合作為中/低廢棄物處置，故開始處置場申請程序，歷經 30 年的調查、申請與審查程序，於 2007 年獲得建造與運轉處置場之許可，原本的鐵礦場轉作為處置窖，可接收約 303,000 m<sup>3</sup> 之不產熱放射性廢棄物，為德國第一座依循核能相關法規之處置場。從 1977 年至 2007 年，Konrad 處置場計畫之相關調查與工程規劃費用達 9.3 億歐元，以現今匯率(35.5 元台幣兌換 1 歐元)估算約為新台幣 330.2 億元。

Konrad 處置場原由聯邦輻射辦公室(Bundesamt für Strahlenschutz, Bfs)管理，於 2017 年 4 月 25 日聯邦環境部 (Federal Environment Ministry) 將管理權轉交給最終處置聯邦公司 (Bundesgesellschaft für Endlagerung, BGE)，BGE 為處置專責國營事業，被賦予的主要任務為：

1. 設置放射性廢棄物處置場
2. 制定場址選址提案與調查
3. 建立場址相關調查計畫與測試標準
4. 執行場址地表與地底調查，以及相關安全需求調查
5. 提出產熱放射性廢棄物(高階放射性廢棄物)之建議處置場址

德國決定將放射性廢棄物處置在深層且地質穩定的環境，確保處置安全且無須進行維護，Konrad 處置場位於地表下數百公尺深，可長時間將廢棄物隔離於生物圈環境外。而穩定的地質環境意味著地震安全，隔離於生物圈環境外則意味著具放射性活度之物質不會隨著地下水流。處置場位於地底下 800 m 至 1300 m 之鐵礦石岩層，岩層上方有約 400 m 厚的黏土層(Clay)作為不透水層，這項天然障壁可確保放射性廢棄物與生物圈隔離。

Konrad 處置場設置 2 個豎井「Konrad 1」與「Konrad 2」，2 個豎井相距 1.5 km，地表設施占地面積分別為 11 公頃與 5.5 公頃，相對位置如圖 3.3.1。Konrad 1 用於人員運輸、材料運輸，以及將廢土帶至地面；Konrad 2 主要為通風豎井與運送廢棄物，由於過去舊型起重設備已老舊損壞，現階段正在更新起重設備。

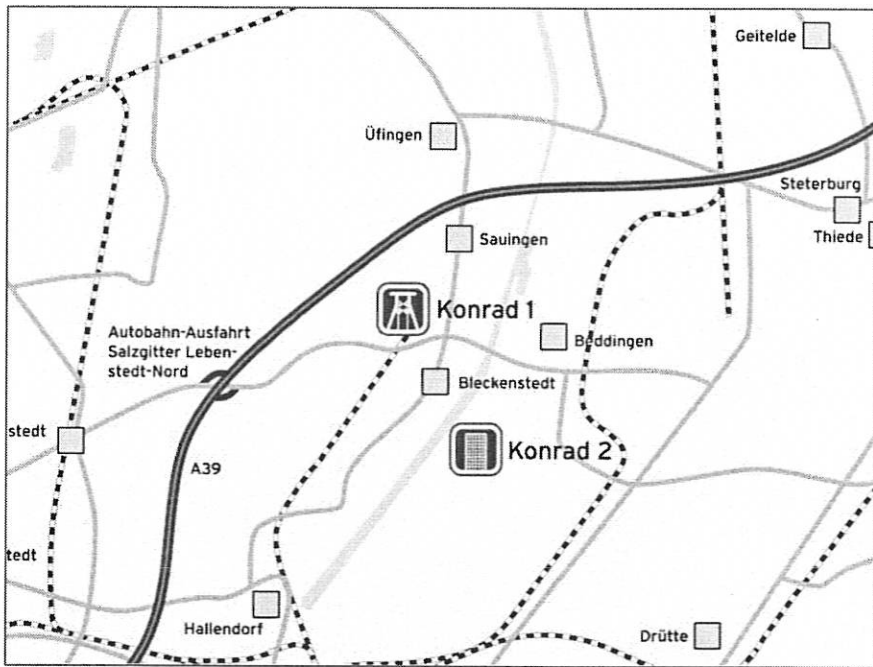
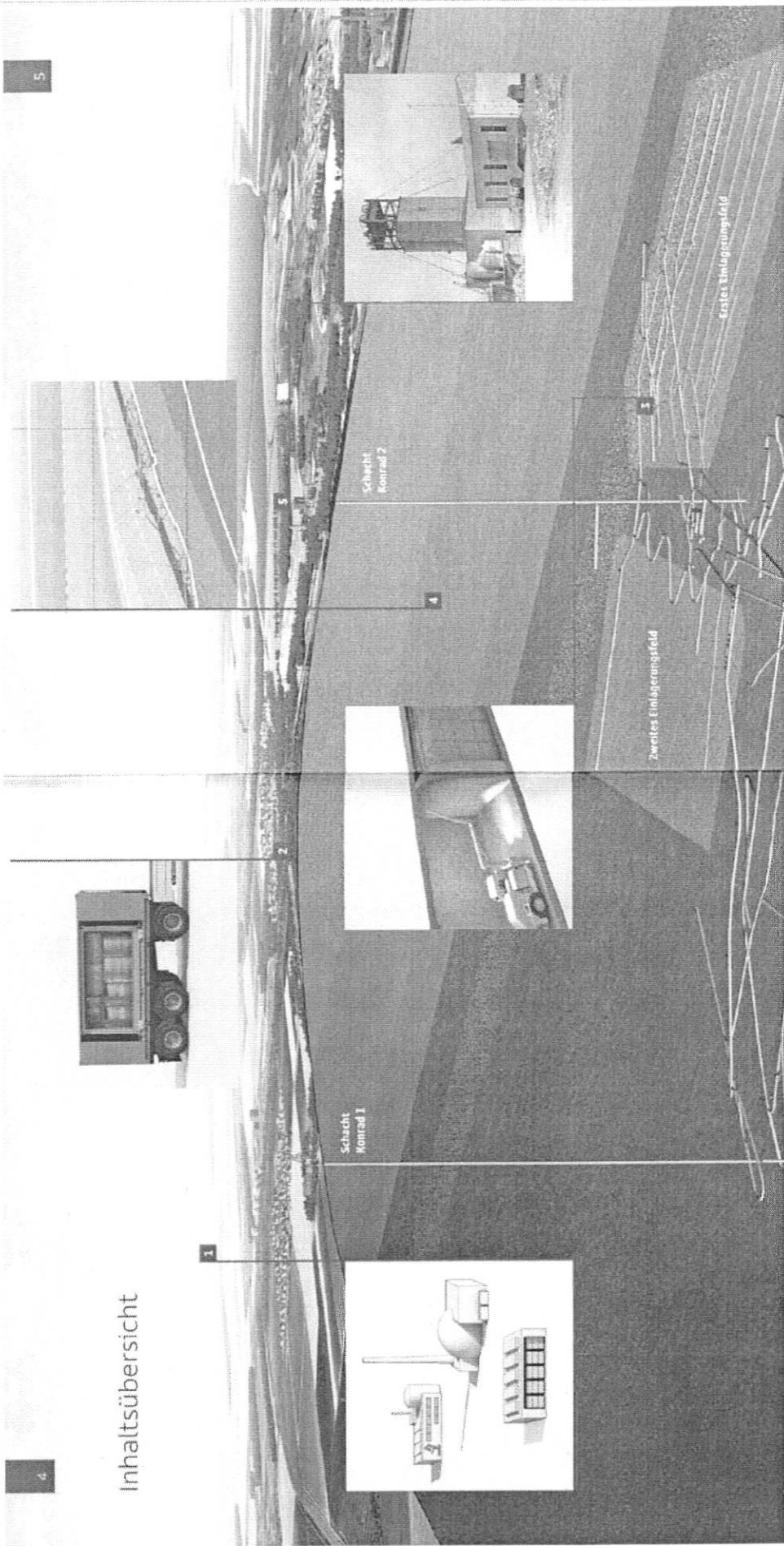


圖 3.3.1 Konrad 處置場地表豎井相對位置圖

地底處置坑道設計為地底 800 m 深之水平坑道，約寬 7 m、高 6 m，目前坑道外觀如圖 3.3.2，坑道配置如圖 3.3.3，以下逐項說明。



圖 3.3.2 Konrad 處置坑道現況



Inhaltsübersicht

圖 3.3.3 Konrad 處置坑道配置圖

## 1. 德國中低放射性廢棄物來源

德國放射性廢棄物有 55%來自核能電廠、4.5%源自核能工業、37%為研究單位(包含部分核能電廠廢棄物)，以及 3.5%的國家公共設施。過去核能電廠廢棄物被運往聯邦政府研究單位，因此研究單位中含有部分核能電廠廢棄物，而國家公共設施包含前東德核能電廠與 11 個接收站。

迄今，德國貯存的中低放射性廢棄物超過 120,000 m<sup>3</sup>，隨著核能電廠除役計畫的推動，未來廢棄物產量將大幅提升，因此 Konrad 設計容量達 303,000 m<sup>3</sup>，作為接收德國境內的中低放射性廢棄物。整體而言，約有三分之二的中低放射性廢棄物來自於核能電廠與核能工業，三分之一為國家公共設施。

## 2. 放射性廢棄物運輸

目前規劃使用鐵路與公路運輸放射性廢棄物，未來每年約有 20 輛鐵路貨櫃與 10 輛卡車運送廢棄物至 Konrad 處置場，運輸工具的選擇依據廢棄物貯存位置是否鄰近鐵道。

## 3. 放射性廢棄物處置與環境監測

放射性廢棄物處置深度約為地底 800 m 至 850 m 深，處置場先開放 Konrad 2 豎井附近的 1 號處置區，1 號處置區可容納 63,000 m<sup>3</sup> 的廢棄物，裝滿廢棄物後將以特殊混凝土進行封閉作業，同時再次確認廢棄物貯存位置，這樣的作法將實現處置場免於維護與長期處置安全的目標。而對於環境監測的部分，將會針對處置場排出之氣體執行輻射監測，確保無放射性核種經由氣體交換系統排放至大氣環境，並在地表執行游離輻射監測，監視環境輻射劑量。

## 4. 地質環境

Konrad 作為鐵礦場的時間非常短暫，因此處置場內的空洞區域很少，處置區亦不使用舊的礦坑道，而是重新開挖新的處置坑道與建立處置窖。處置場將廢棄物處置在 12 m 至 18 m 厚的鐵礦層中，而上方的黏土層形成天然障壁隔離地表水，確保長期處置安全，避免後代子孫處理放射性廢棄物之負擔。從 2011 年 6 月以來，Konrad 處置場持續執行壓力測試，負責審查 Konrad 的廢棄物處理委員會對於 Konrad 處置場提出正面的結論。

本次參訪由 Konrad 1 號豎井(圖 3.3.4)搭乘電梯至地底約 1,000 m 深，地底搭乘接駁車(汽油

車)，一路參訪坑道挖掘、汽車維修預定區、混凝土(水泥)預拌區，以及處置規劃區(靠近 Konrad 2 號豎井)，坑道內照片如圖 3.3.5。途中處置場人員有提及，處置場藉由紅外線設備(圖 3.3.6)掃描，監測坑道變形量。

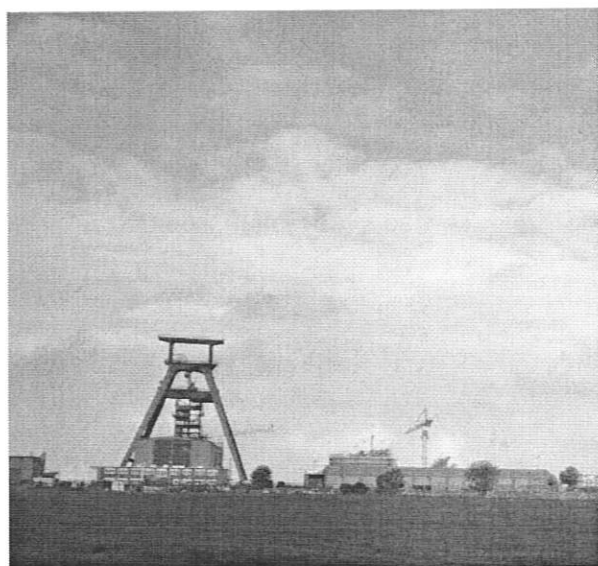


圖 3.3.4 Konrad 1 豎井圖



圖 3.3.5 坑道內合影



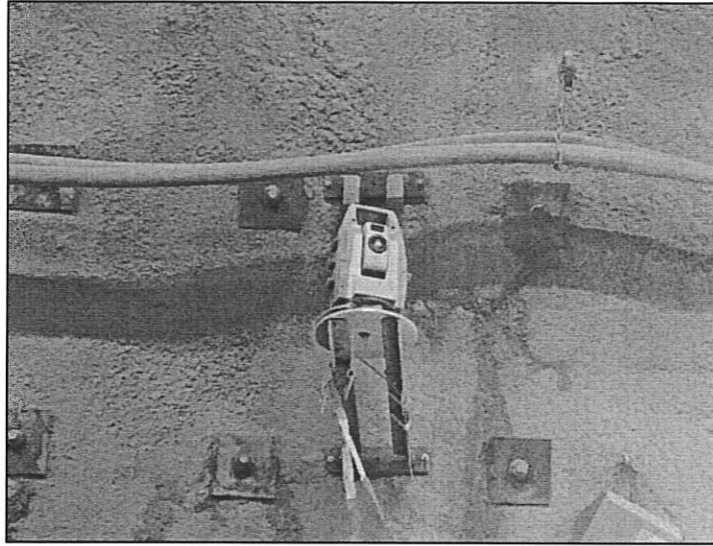


圖 3.3.6 紅外線監測設備

處置場參訪後的問題與討論，台灣參訪團隊提出了 2 個問題：

1. 坑道落石處理

坑道開挖時設有落石防護網避免落石直接掉落，噴塗混凝土襯砌時將直接把落石一同包含進去，針對比較大的落石，則會先以人工移除後，才做混凝土襯砌。

2. 處置坑道是否有火災設計考量

由於目前屬於坑道建設期間，坑道內設置有滅火器因應緊急事件，且對於作業人員進行消防安全編組，在街火警通報時立即啟動互助滅火作業，避免災情擴散。

參訪前，Konrad 提供完整的安全說明與處置場基本介紹(圖 3.3.7)。進入處置場需穿著完整配備，現場提供工作套裝、內衣褲、襪子、工安鞋、防寒外套、安全帽、同步講解耳機、手電筒、護目鏡以及自救氧氣瓶(圖 3.3.8)。結束後，本公司致贈禮品，感謝 Konrad 處置場人員帶領台灣參訪團隊參觀 Konrad 處置坑道與講解。



圖 3.3.7 參訪前安全解說



圖 3.3.8 參訪人員皆須配備完整安全套裝

#### 四、 菲利普斯堡核能電廠

菲利普斯堡(Philippsburg)核能電廠隸屬於德國 EnBW 電力公司，場區具有 2 部機組，1 部為熱功率 2,575 MWt 的沸水式反應器(Boiling Water Reactor, BWR)，稱為 Philippsburg 1 號機；另 1 部為熱功率 3,950 MWt 的壓水式反應器(Pressurised Water Reactor, PWR)，稱為 Philippsburg 2 號機。Philippsburg 1 建於 1970 年，1980 年 3 月開始正式商轉，2011 年 8 月開始進入永久停機並申請核能電廠除役，2013 年 4 月 EnBW 提送除役計畫至巴登-伍騰堡邦環境、氣候與能源工業廳(Baden-Württemberg Ministry for the Environment, Climate and Energy Industry)審查，於 2017 年 4 月取得除役許可後，正式進入除役階段；Philippsburg 2 建於 1977 年，1985 年 4 月開始正式商轉，預計於 2019 年停機。Philippsburg 1 規劃拆除部分主要迴路，包含泵、管件，電纜管線、電氣裝置與汽機廠房，預計耗費 10 年至 15 年拆除，使 Philippsburg 1 成為一般傳統工廠，不再受原子能相關法規管轄。對於核能電廠除役，EnBW 額外準備 2 兆歐元作為除役費用。

針對放射性廢棄物處置基金，EnBW 總共提撥約 24 兆歐元作為放射性廢棄物貯存與高放處置費用，政府再提撥給 BGZ (BGZ Gesellschaft für Zwischenlagerung mbH，BGZ 中期貯存公司)負責處理，BGZ 為一間私人企業，資本由聯邦政府通過預算後給付，專門負責放射性廢棄物中期貯存與最終處置，確保中期貯存設施可安全的運轉與貯存廢棄物，目前除了管理 Ahaus 與 Gorleben 中期貯存設施外，同時從 2019 年開始也管理各個核能電廠的中期貯存設施，而從 2020 年開始，陸續有 12 個低與中放射性廢棄物倉庫之廢棄物將運往位於核能電廠的中期貯存設施 (Philippsburg 電廠也是其中一座)，將廢棄物管理權責由各核能電廠轉移至 BGZ，由 BGZ 統一管理。

目前 Philippsburg 廠區內已設有一座室內用過核子燃料乾式貯存設施(圖 3.4.1)，採用室內被動通風設計，貯存區建築物尺寸為 92 m×37 m×18.5 m，基底層厚度約 1.5 m 至 2 m，壁厚設計約 70 cm 至 80 cm，建築物採用「U」字型設計 2 個用過核子燃料貯存區，總活度預估為  $1.5 \times 10^{20}$  Bq，預定貯存 152 個 CASTOR® V 系列的金屬護箱，而單一金屬護箱最大可接受衰變熱為 39 kW。此外，貯存設施設有不斷電系統 30 kVA，可供貯存設施維持最低例行性運轉電力 1 小時，包含維持護箱氣體洩漏監測、設施安全系統，以及火災防護系統等。對於輻射防護監測設備，則設有個人警報器、手足與全身污染度量系統、室內空氣監測設備、空間輻射監測，以及廢水監測

設備。



資料來源：BGZ (2019)

圖 3.4.1 Philippsburg 用過核子燃料乾式貯存設施外觀

用過核子燃料貯存設施參訪後，台灣參訪團隊提出以下問題與 Philippsburg 電廠人員進行討論：

1. 為何用過核子燃料乾式貯存設施無設計熱室(Hot Cell)或水池

德國用過核子燃料貯存採用金屬護箱，金屬護箱設有雙重上蓋且會監測氣體洩漏，一但發現有滲漏時將會確認是第一層蓋或第二層蓋洩漏，若第一層蓋洩漏，則再焊封一層上蓋，若第二層洩漏，則僅更換第二層蓋，確保金屬護箱密閉性，因此不需設計熱室或水池執行用過燃料再取出作業。而目前德國用過核子燃料尚未找到最終處置場，倘若未來最終處置場認為有需求建立再取出室，將視需求設置，惟目前正在試圖證明金屬護箱可直接用於最終處置。

2. 用過核子燃料貯存設施的運轉人力

Philippsburg 用過核子燃料貯存設施在正常工作期間設置 1 個班 8 個人；保全團隊則編制 6 個輪班，每 1 個班 5 個人，其中 1 個為 BGZ 人員，負責協助確認監測資料與訊號，其他 4 人則為一般保全人員。

### 3. 為何用過核子燃料貯存設施內設有除濕機

貯存設施剛建好時，因混凝土含有水分，導致室內濕氣較重，造成地板與牆壁出現水痕與水珠，故設置除濕機降低室內溼度。而近 5 至 6 年，已經沒再使用除濕機了。

### 4. 為何監控金屬護箱氣體洩漏僅監測「有洩漏」或「無洩漏」，而不採用連續性紀錄資料

德國專家反問為何需要連續性紀錄監測數值？就金屬護箱而言，我們主要是關心他是否有出現氬氣洩漏就好，一旦發現氬氣洩漏將立即安排檢測洩漏位置予以處理，並視洩漏位置決定是否再加上第三個密封上蓋。因此，連續紀錄監測數值，例如紀錄密封氣壓力為 6 bar，紀錄數值上一直顯示 6 bar 並無實質參考意義，因為一旦發生洩漏，其密封氣壓是會瞬間下降，而不會是緩慢或抖動下降。

用過核子燃料貯存設施參訪與技術討論結束後(圖 3.4.2)，致贈禮品感謝 Philippsburg 電廠人員分享核能電廠除役現況與近程規劃，以及帶領台灣參訪團隊參觀用過核子燃料貯存設施。



圖 3.4.2 Philippsburg 核電廠技術討論會議

## 肆、心得與建議

本次赴德國參加「台、德低放射性廢棄物最終處置國際會議」，並安排參訪 Siempelkamp、EWB 盛裝容器製造工廠、Konrad 處置場，以及 Philippsburg 核能電廠與用過核子燃料乾式貯存設施，拜訪過程透過簡報與技術交流，讓整個參訪團隊對於金屬護箱製作、放射性廢棄物盛裝容器製作、豎井及坑道式深地層處置、核電廠除役規劃，以及用過核子燃料乾式貯存設施有更進一步的了解。

### 一、心得

1. 透過與德國 GNS 公司技術交流過程，學習到核能電廠除役與拆除計畫，需與盛裝容器與處置場需求進行搭配，特別是針對爐心拆除切割部分，因爐心屬於高輻射劑量廢棄物(例如 GTCC 與 C 類廢棄物)，故於除役計畫中需詳細估算不同區塊之爐心活化程度，依照活化評估結果設計盛裝容器所需之屏蔽厚度，並考量處置場可接收之廢棄物重量(以 Konrad 處置場而言為 20 MT)，進而擬定使用的盛裝容器尺寸與裝載率。由此可見，核能電廠除役與拆除計畫、盛裝容器選擇，以及處置規劃這三者息息相關，牽一髮而動全身，故須具備通盤的考慮。
2. 參觀 Siempelkamp 金屬護箱製造工廠時，深刻地感受到德國製造工藝的精湛技術與嚴謹態度，將超過 5 m 高，重達 130 噸的鑄鐵桶逐步加工並經過每個步驟嚴格的品質管控，方可造就出一只金屬護箱。過去更透過各種實際試驗嘗試證明金屬護箱的耐久性與安全性，德國先進的製造技術實力豐厚。
3. 參觀 EWB 公司盛裝容器製造工廠時對於技術人員提到「每個爐心切割廢棄物的盛裝容器都應該有自己的裝載計畫」這件事情感到印象最為深刻，如同回應 GNS 技術交流內容，除役切割爐心組件部分應要能精確掌握爐心活化分析結果，理論上能夠掌握每一塊爐心切割廢棄物具有多少放射性活度，再搭配適合的盛裝容器，因此每個盛裝容器將有自己的裝載計畫，規劃要裝載的廢棄物類型、活度、關鍵核種濃度，以及重量等。這部分非常值得台

灣在推動核能電廠除役與拆除計畫時納入考量，透過事前評估與完整計畫，降低操作風險。

4. 德國 Konrad 低放處置場參訪過程中，可發現德國對安全要求非常嚴謹，參訪前認真且完整的講解安全注意事項，並示範個人緊急氧氣設備如何使用，而參訪過程中另一組當地參訪團隊拿下安全帽時，即刻被導覽技術人員喝斥並停止解說，直至又戴回安全帽方繼續講解。這一點非常值得未來台灣處置場施工、運轉與參訪人員參考，嚴格且不苟的工安管制可降低工安意外。
5. 德國 Konrad 低放處置場現階段雖未設有民眾參訪中心(Public Relation Center)，但可接受一般民眾在處置場興建階段申請參訪，透過這樣的作法讓民眾看到處置場興建之進度，並透過實地講解拉近與民眾的距離，讓民眾認同處置場，提升民眾對處置場的信心，這部分可作為未來台灣處置場規劃參考。
6. 德國 Philippsburg 核能電廠室內用過核子燃料乾式貯存設施參訪，體驗到何謂「用過核子燃料貯存期間產生的衰變熱」，過去僅在學理上學習用過核子燃料會產生衰變熱，因此在貯存與處置規劃時須特別考量餘熱被動排除系統。參訪一進到貯存室時，即可感受到熱輻射迎面而來，瞬間可以理解到為何需用過核子燃料貯存需考量與設計熱對流，將學理與實際案例結合。

## 二、建議

### 1. 除役計畫更加細緻化

台灣核能一廠除役計畫已完成審查與公告，核能二廠除役計畫雖屬審查階段，其規劃雛型已呈現於公開資料中，除役計畫概述核能電廠的廠址、機組元件、廢棄物數量盤點、輻射安全規劃，以及未來土地再利用，讓人能快速掌握核能電廠除役概況與執行方向。然而，當要落實至除役執行階段時卻略顯不足，例如核能電廠除役最在意的反應器爐心組件被中子活化之細部評估與爐心切割方式，這部分資料在除役計畫雖有盤點數量與總活度，但卻無針對活化部位與該部位之活化核種濃度詳細描述，而爐心活度又佔整體除役廢棄物 9 成以上的活度，經由德國

技術交流之經驗回饋，爐心活化計算將可搭配盛裝容器的選擇與輻射屏蔽厚度設計，進而擬定切割與廢棄物裝載計畫，以降低作業時間與風險(例如裝載後發現輻射劑量過高，或是重量過重，或是重心偏移，將導致須重新裝載)，此部分為一氣呵成之考量。因此，除役計畫於規劃時應強化此部分之完整性，使後續執行除役拆除作業可依照除役計畫順利執行，而不須額外再做一次計畫評估，這部分將可作為未來核能三廠除役計畫之撰寫考量。

## 2. 用過核子燃料乾式貯存型式考量

現階段台灣用過核子燃料乾式貯存係採用密封鋼筒搭配混凝土護箱，與德國主要使用金屬護箱的貯存方式不同。金屬護箱可作為貯存與運輸兩用護箱，作為貯存與運輸兩用的金屬護箱需通過撞擊、火燒與墜落測試之要求，方可符合乙型運輸容器之抗意外事件能力。在國外，金屬護箱主要用於將用過核子燃料運送至再處理廠進行再處理。燃料金屬護箱成本較密封鋼筒高，然配合我國目前推動集中式貯存，未來從各電廠搬運至集中貯存場時，金屬護箱因具備運輸功能可直接運送，而無需像密封鋼筒須裝填至運送護箱方可運送。

## 3. 處置場民眾溝通的確實度

參訪 Konrad 處置場的路上，進入當地小鎮時就看到許多民眾反對處置場設置之裝置設備與抗議字眼，雖然在技術層面已透過不斷的安全論證，證實處置場的安全性，然而民眾的心理抗拒程度卻非用簡單的學理證明即可抹滅，消除民眾心中的不安全感亦並非一蹴可幾，唯有透過誠意不斷的溝通，方可逐步讓民眾理解、認同至接受。反觀日本六所村，六所村的居民則與低放處置設施和平共處，在鄉鎮街道上看不到任何的反彈與抗議文宣，甚至因此提供六所村居民工作機會與提升整體收入水平。

因此，無論是高放或低放處置，處置場民眾溝通將是未來處置事業推動最重要的一環，唯有獲得民眾的認同方可順利執行後續處置規劃，故建議未來在制定溝通計畫時需更加的完整，同時讓溝通管道與方式更加多元化，並從科普角度將艱澀的處置安全與技術分析議題轉化為民眾較能理解的形式。