

出國報告(出國類別：開會)

## 赴德國進行除役技術交流會議並拜 會巴登符騰堡邦除役相關機構

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：張學植 核能後端營運處處長

莊鴻瑜 核能技術處副處長

張瑞林 第一核能發電廠副廠長

劉 明 第二核能發電廠副廠長

吳俊宏 第三核能發電廠廢處組經理

游慧婷 核能後端營運處核能工程師

派赴國家：德國

出國期間：108.03.18~108.03.27

報告日期：108.05.06

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

赴德國進行除役技術交流會議並拜會巴登符騰堡邦除役相關機構

頁數 33 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/機關/單位/職稱/電話

張學植/台灣電力公司/核能後端營運處/處長/(02)2365-7210

莊鴻瑜/台灣電力公司/核能技術處/副處長/(02)2366-7113

張瑞林/台灣電力公司/核一廠/副廠長/(02)2338-3501

劉 明/台灣電力公司/核二廠/副廠長/(02)2498-5990

吳俊宏/台灣電力公司/核三廠/經理/(08)889-3470

游慧婷/台灣電力公司/核能後端營運處/核能工程師/(02)2365-7210

出國類別：1 考察  2 進修  3 研究 4 實習 5.其他(開會)

出國期間：108.3.18 ~ 108.3.27 出國地區：德國

報告日期：108.5.6

分類號/目：

關鍵詞：核能後端/核能電廠除役

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國任務係因本公司核一廠將於今年進入實質除役階段，未來核二廠及核三廠也將陸續進入除役階段，希望能透過與國際間之除役技術交流，了解國際於除役作業上之相關作法並從中學習除役關鍵技術與經驗，有助除役計畫之推動與執行。

德國政府已於 2011 年 5 月 29 日宣布將於 2022 年關閉所有的核電廠，至 2011 年 9 月，僅剩下 E.ON，Vattenfall，RWE，和 EnBW 等 4 個核電公司。在 2011 年 3 月福島事故前，德國 25%電力由核能發電提供，至 2016 年 10 月，核能發電比例降至 16%，並預估 2022 年德國將剩餘 4 座核能電廠運轉提供 4GWe 電力，且從 2023 年 1 月 1 日起，德國將無核能電廠運轉提供電力。目前德國核能電廠階已陸續進入除役階段，因此德國在整個核能除役應用領域，包括人才培育規劃、放射性廢棄物管理、除役作業相關之機械設備發展及電廠除役作業執行上皆具有豐富實務經驗，可作為本公司於除役計畫推動與執行之借鏡。

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

## 目 錄

壹、出國目的.....	3
貳、出國過程.....	4
參、參訪機構及除役技術討論內容摘要.....	6
一、Obrigheim 核電廠.....	6
二、卡爾斯魯爾理工學院(KIT)及歐盟聯合研究中心(JRC).....	10
三、南德 TÜV Süd 集團.....	16
四、Wälischmiller Engineering 公司.....	21
五、德國西屋公司(Westinghouse Electric Germany GmbH).....	25
六、Philippsburg 核電廠.....	27
肆、心得與建議事項.....	30

## 壹、出國目的

德國「巴登符騰堡邦國際經濟與科技合作協會」(bw-i)於 107 年 9 月透過德國經濟辦事處安排，在本公司舉辦「臺德核能對話—德國巴登符騰堡邦核能除役 35 年經驗與能力」論壇，藉由此論壇加深我國對德國核能電廠除役產業之瞭解。為深化兩國除役技術之交流，bw-i 特規劃邀請本公司赴巴登符騰堡邦進行除役技術交流與參訪，並由德國經濟辦事處協助安排除役技術交流會議及拜會行程。

本公司希望能藉此參訪交流機會了解德國在核能除役應用領域，包括人才培育規劃、放射性廢棄物管理、除役作業機械設備應用及電廠除役作業執行等方面之實務經驗，作為本公司推動與執行除役計畫之借鏡。

出國期間除透過與德國核後端營運業者及技術專家進行技術交流會議，了解目前德國核電廠除役工作規劃方向、執行現況及放射性廢棄物管理作法，討論如何與核能相關技術產業建立合作產業鏈，增進我國於核能除役領域之發展，也安排實地參訪德國除役中之核能電廠，藉此汲取其除役作業實務執行經驗，有助於本公司規劃及推動除役與放射性廢棄物處置計畫，增進後端營運計畫之週延性及效益性。

## 貳、出國過程

本次出國任務係由德國經濟辦事處邀請本公司赴巴登符騰堡邦進行除役技術交流與參訪，除本公司由核能後端營運處張處長學植率隊，團員包含核能技術處莊副處長鴻瑜、核一廠張副廠長瑞林、核二廠劉副廠長明、核三廠吳經理俊宏、核能後端營運處游慧婷工程師前往外、另德經處亦邀請核能研究所施副所長建樑、張組長淑君、工研院王主任立華、劉組長育維及李資深工程師昭仁，一同前往。

出國行程總計 10 天，自 108 年 3 月 18 日出發，迄 3 月 27 日返國，行程簡述如下：

日期	行程
3/18(一)~3/19(二)	去程(台北→德國法蘭克福)
3/20(三)	上午： 參訪 EnBW 巴登-符騰堡能源公司--Obrigheim 核電廠 下午： 與卡爾斯魯爾理工學院(Karlsruhe Institute of Technology, KIT)並與歐盟聯合研究中心(Joint Research Centre (JRC) of the European Commission)進行除役技術交流會議 - 核能除役安全介紹 - 卡爾斯魯爾理工學院核能除役介紹 - 實驗室參訪 - JRC 介紹
3/21(四)	與德國巴登符騰堡聯邦環境、氣候保護暨能源部代表會面，並與南德 TÜV Süd 進行除役技術交流會議 - 巴符邦德國核設施退役許可和監督程序 - 核能設施除役 TÜV SÜD 解決方案－燃料束處理、存儲、淨化及拆解技術 - LSP 核輻射防護、核廢料管理、放射性廢物處理、臨時存儲以及核能設施清理
3/22(五)	拜會德國 Wälischmiller Engineering 公司，並進行除役作業相關之機械設備討論會議 - Wälischmiller Engineering 公司簡介 - 除役作業相關之機械設備介紹 - Company tour and demonstration
3/23(六)	資料整理
3/24(日)	路程(Konstanz-Mannheim)

3/25(一)	上午： 拜會德國西屋公司(Westinghouse Electric Germany GmbH) 並進行除役技術交流會議 - 沸水式反應爐拆解規劃技術 - 實地導覽 下午： 參訪 EnBW 巴登-符騰堡能源公司-- Philippsburg 核電廠
3/26(二)~3/27(三)	返程(法蘭克福-台北)

## 參、參訪機構及除役技術討論內容摘要

### 一、Obrigheim 核電廠

本次參訪首站 Obrigheim 核電廠已於 2008 年進入除役階段。Obrigheim 核電廠（Kernkraftwerk Obrigheim, KWO）是一座擁有電力輸出 357 MWe（總計）的壓水式反應爐，由西門子公司所建造。Obrigheim 核電廠座落於德國 Neckar-Odenwald-Kreis，於 1969 年開始商業運轉，在 2005 年 5 月 11 日停止發電。

表 1 Obrigheim 核電廠基本資料

Federal state	Baden-Württemberg
Type (construction line)	Pressurised water reactor
Current operator	EnBW Kernkraft GmbH
Manufacturer	Siemens-Schuckert AG
Owner	EnBW AG
Start of commercial operation	1 April 1969
Shutdown date	11 May 2005
First decommissioning and dismantling license	28 August 2008
Gross electric capacity	357 MW
All fuel removed from plant	yes



圖 1 Obrigheim 核電廠

## (一)除役計畫簡介

首先由在 EnBW 公司擔任顧問的 Dr. Oliver Wilhelm 和 Mr. Dieter Rudolf (head of residual operation & decommissioning in KWO) 以及 Mr. Michael Hillmann (原為 Obrigheim 核電廠運轉人員，現任 Obrigheim 核電廠除役拆除計畫 project leader)進行 Obrigheim 核電廠除役計畫的整體簡報說明。

Mr. Dieter Rudolf 表示一般來說核電廠每一機組的除役拆除費用約為 5-10 億歐元，視不同機組大小而異，其中不含放廢處理費用。Obrigheim 核電廠除役中包含爐心內部組件等受活化部件的拆除工作是分為 4 個招標案，皆由 100%國營的 EWN-Gruppe (EWN 集團)中的 EWN 公司 (EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH)得標與執行。在 Obrigheim 核電廠除役拆除之前 EWN 公司已有 Greifswald 核能廠 (KGR 1-5)以及 Rheinsberg 核電廠(KKR)的除役拆除經驗。

Obrigheim 核電廠於 2005 年就已停止運轉，並於 2008 年開始進行除役拆除作業，目前汽機廠房已全部清空，反應器壓力槽已於 2016 年完成切割作業，反應器壓力槽周圍的生物屏蔽牆拆除作業亦已於 2018 年執行完畢，S.G.蒸汽產生器則是進行化學除污及表面塗漆後外送至鋼鐵工廠待 decay storage 後再拆解。目前廠內有約 130 名員工以及 100 名下包商，不同於美國可將運轉執照連帶除役申請進行移轉，德國電力業者對於其核電廠的責任必須負責直至除役工作完畢為止，也由於 Obrigheim 核電廠除役責任最後是落在 EnBW 公司身上，因此除役工作主要由 EnBW 自行規劃主導。

## (二)用過核燃料處置

Obrigheim 核電廠一開始除役時對於用過核燃料處置的規劃是將用過核燃料送至法國境內進行再處理，因此並未於廠內建置中期貯存設施 (Intermediate Storage)貯存用過核燃料，然而其後因故計畫改變，Obrigheim 核電廠內剩餘 342 束用過燃料未送至法國。

因 Obrigheim 核電廠廠區較小，於廠區內建置中期貯存設施的經濟效益不彰，在 Dr. Oskar Grözing (時任巴登-符騰堡邦政府監管核設施的最高主管)積極運作下，EnBW 將此 342 束用過核燃料分 5 批 (前四次運輸分別於 2017 年 6 月、9 月、10 月和 11 月進行，最後一批於 2017 年 12 月 19 日)，共計 15 座 CASTOR®貯存桶裝載運輸，由 Obrigheim 核電廠內經河運方式 (經巴登-符騰堡邦境內的 Neckar 河，為萊茵河的第四大支流)送至同邦管轄之 Neckarwestheim 核電廠 (GKN) 內所建置中期貯存設施貯存。而 Neckarwestheim 核電廠中期貯存設施的建設

及運轉許可已經根據原子能法向管轄機關聯邦輻射防護局（BfS）提出申請，貯存 15 座 CASTOR®貯存桶，並以垂直方式貯存在建築物內。

### (三)拆除作業說明

Obrigheim 核電廠由於是 EnBW 第一座自行申請除役的商用核電廠，因此對聯邦政府、邦政府以及 EnBW 公司來說都是一種學習。Obrigheim 核電廠選擇的除役策略是立即拆除，由於當時除役程序尚未趨於完備，因此管制單位將拆除過程分成 4 個階段提出申請拆除執照，並將持續進行至 2020 年止。

Obrigheim 核電廠人員 2004 年開始著手準備擬定核電廠的除役及拆除計畫之申請，並分為 4 個部分(階段)分別(最後一次是 2015 年申請，2018 年獲准)向邦政府巴登-符騰堡邦環境、氣候與能源工業廳(Baden-Wuerttemberg Ministry for the Environment, Climate and Energy Industry，德文簡稱 BMU)遞送除役及拆除計畫同時申請除役及拆除的許可申請。

當機組運轉至 end-of-life 時，與真正拿到除役許可開始除役這段時間為 post-shutdown phase，這段時間約花費數年。在這段時間內燃料可以移除，運轉模式和廢料處置可以依使用運轉執照例行操作，在此階段的後期，必須申請除役執照。只有獲得除役執照的許可，才能進行除役拆除工作。

除役共分為 4 個執照階段，第一執照階段申請過程共花費 4 年才拿到拆除取可。第二執照階段申請過程共花費 3 年才拿到拆除取可。第三執照階段申請過程共花費 3 年才拿到拆除取可。第四執照階段申請過程共花費 3 年才拿到拆除取可。

- (1) 第一執照階段---主要拆除汽機廠房內之高、低壓汽機，油槽，汽水分離再熱器，泵、熱交換器，閥類，管路等廠房設備，但不包括廠房建物。
- (2) 第二執照階段---主要拆除反應器廠房的蒸汽產生器及反應爐冷卻水系統，輔助冷卻系統，燃料廠房的冷卻水系統上的設備、組件。蒸汽產生器並未採取立即分解，而是採用 DECAF STORAGE 方式，待其衰變至低值後再予以分解，以減少工作人員接受劑量。
- (3) 第三執照階段---主要拆除反應爐槽，內部組件，生物屏蔽、圍阻體內燃料池結構件。目前 Obrigheim 核電廠除役拆除過程正進行生物屏蔽，燃料池等之拆除作業。
- (4) 第四執照階段---主要拆除廠房內之排水、吊車及通風設備。

Obrigheim 核電廠除役時，拆除分解的低放射性廢棄物經由除污及測量分析過程後，低放射性廢棄物若其活度大於法規限值則置於低放射性廢棄物儲存庫內儲存，若其活度小於法規限值則無限制性外釋。經其電廠除污經驗，約 98% 的物質可以外釋成為再使用物質。

#### (四) 實地參訪

本次參訪除了簡報討論外，並實地走訪 Obrigheim 核電廠，為移出反應器廠房內切割後的設備所建置的輸送通道，該通道可荷重 25 噸，Mr. Michael Hillmann 表示反應器內部組件的切割工作僅花 1 年的準備後，3 年的時間即切割完畢。另外也實際走入反應器廠房參觀，基本上金屬部分已完成拆除，僅餘混凝土建築物待拆。最後參觀廢棄物解除管制外釋檢查站，其解除管制標準為  $10\mu\text{Sv per year}$ ，現場拆下的金屬板、管路或支架依類別整齊分裝於統一規格的運輸箱內，各金屬殼或板材幾乎是裁切並擊扁成大小相同樣式，且各個運輸箱亦貼有本箱貯存廢料來源履歷(包含相關除役處理過程記錄)、表面劑量率及辨識掃描條碼。觀摩過程中 Mr. Michael Hillmann 特別指出各拆除區域須規劃暫存區，以便於暫存拆解下來的設備，後續再依類別尺寸進行分類裝箱。現場亦看到很多拆卸下來的小型泵、管件、馬達等物件，堆放在牆面鐵架上，都是可外釋物品，但似乎未規劃後續處理處置措施，致使外釋物品堆置。

## 二、卡爾斯魯爾理工學院(KIT)及歐盟聯合研究中心(JRC)

### (一)卡爾斯魯爾理工學院 (KIT)簡介

卡爾斯魯爾理工學院（德語：Karlsruher Institut für Technologie，Karlsruhe Institute of Technology，縮寫為 KIT）既是一所德國巴登-符騰堡邦的大學也是一所隸屬於亥姆霍茲聯合會\*旗下的國家型研究機構，擁有約 9,000 名雇員以及約 25,000 名學生以及四百名教授，年度預算約為 8.6 億歐元。大學由巴登-符騰堡邦支助，研究中心由聯邦政府支助。KIT 為全球最大研究與教育機構之一。目標為替全球能源、運輸與資訊領域有所貢獻。以亥姆霍茲(Helmholz)為中心，KIT 為「核廢料管理、安全與輻射研究 (NUSAFE)」計畫中的最大合作夥伴，使用先進的實驗與計算基礎設備，研究領域涵蓋安全方面，如：核電廠營運、核設施有效除役、核設施管理與最終核廢料處置措施等。

\*亥姆霍茲聯合會 (Helmholtz-Gemeinschaft)，全稱「德國亥姆霍茲國家研究中心聯合會」(Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren) 是德國最大的科學研究機構，由 17 個各自獨立的自然科學、工程學、生物學和醫學研究中心組成，員工總數有約 31,000 人，年經費超過 30 億歐元。

KIT 坐落於德法邊境城市卡爾斯魯爾(Karlsruhe)，卡爾斯魯爾是巴登-符騰堡邦的第二大城市，人口約 28 萬人，是一座 17 世紀後才逐漸形成的城市，該地區人民常年受戰爭所苦，其中又以 30 年宗教戰爭期間受到法國軍隊的侵襲以及肆虐最為嚴重。

KIT 的前身卡爾斯魯爾大學創建於 1825 年，是德國歷史最悠久的理工大學，2006 年 4 月 11 日與卡爾斯魯爾研究中心 (Forschungszentrum Karlsruhe) 合併，正式成為卡爾斯魯爾理工學院；而卡爾斯魯爾研究中心原為德國的核物理研究中心，成立於 1956 年，研究領域集中在核能相關的研究，德國的核反應爐 Forschungsreaktor 2 和 der Brutreaktor-Prototyp KNK 即在此建造及運轉。隨著德國退出核能的步伐，核物理研究中心轉型為環境科學、能源以及物理學基礎研究為主要任務的綜合研究中心，並更名為卡爾斯魯爾研究中心，2002 年開始隸屬於亥姆霍茲聯合會旗下，目前研究領域涵蓋核子物理、奈米技術、微系統、氣候、環境、新能源等方面，屬於國家級的大型研究中心，擁有雇員 3800 人。2006 年卡爾斯魯爾研究中心與卡爾斯魯爾大學合併時，將核能研究相關部門併入卡爾斯魯爾大學成為 KIT；而有關核設施除役的工程部門則併入國營 EWN 集團並成立 KTE 公司 (KTE, Kerntechnische Entsorgung Karlsruhe GmbH)，專門負責核設施除役工作，KIT 的再處

理中心(Nuclear Fuel Reprocessing Plant Karlsruhe)的除役拆除工作即由 KTE 所承攬與執行。

## (二)KIT 介紹歐盟及德國核電廠現況

首先 Dr. Th. Walter Tromm 簡報歐盟及德國核電廠現況。2011 年 3 月 11 日福島核災事故，德國於同年 5 月宣布，至 2022 年德國全面廢核。311 福島核災事故以前德國境內原有運轉中核電廠 17 座，聯邦政府為表決心，亦於同年 8 月 11 日通過永久關閉 8 座老舊電廠。目前德國 36 座核電廠現況為運轉中 7 座，永久停機中 3 座，除役中 21 座，封存中 2 座，已恢復綠地的有 3 座。運轉中 7 座核電廠亦計畫分別於 2019，2021 及 2022 年前永久停機。

表 2 德國運轉中核電廠停機日期

Power Plant	First criticality	Capacity MW <sub>e</sub>	Scheduled Shut-Down
Philippsburg 2	13.12.1984	1 468	12/2019
Grohnde	01.09.1984	1 430	12/2021
Gundremmingen C	26.10.1984	1 344	12/2021
Brokdorf	08.10.1986	1 480	12/2021
Isar 2	15.01.1988	1 485	12/2022
Emsland	14.04.1988	1 400	12/2022
Neckarwestheim 2	29.12.1988	1 400	12/2022

Dr. Th. Walter Tromm 說明德國的高放永久場址預計於 2031 年決定。至於中低放永久場址則已選定於 Konrad。Konrad 處置場位於下薩克森邦 (Lower Saxony)，過去為鐵礦區，2007 年由德國聯邦行政法院的最終判決確定其為低中放射性廢棄物的處置場場址，此處置場的專責機構原為聯邦環境自然保育與核能安全部(BMU)聯邦輻射防護局(BfS)。BfS 自 2007 年開始舊鐵礦山的改建工程，利用既有的礦區結構正在改建成地下 800-1,300m 深、容積 303,000m<sup>3</sup> 的中低放永久場址，預計 2027 年完工，估計耗資 22 億歐元。根據 2016 年 12 月生效的原子能法令，德國政府須承擔放射性廢棄物中期貯存及最終處置的責任，2017 年 4 月 25 日，德國成立「放射性廢棄物處置專責機構(BGE)」，接掌 BfS 有關執行放射性廢棄物處置的任務，包括 Konrad 處置場建置與營運。2017 年 7 月 3 日，業者轉移 240 億歐元給德國聯邦政府，2019 年起放射性廢棄物的擁有權轉移至德國聯邦政府。

雖然德國核能政策走向非核，但是德國聯邦經濟與能源部仍自國際的

層面考量並決定應繼續投入反應爐安全的相關研究。KIT 自聯邦經濟與能源部 7th German Energy Research Programme (本期計畫期程至 2022 年) 獲得研究經費之 NUSAFE 計畫，著重於核廢棄物管理 67% (核廢處置安全、核廢管理策略) 以及反應爐安全 33% (運轉及設計基準事故、超乎設計基準的事故與緊急應變管理)。

### (三)KIT 除役技術研究發展現況

其後由 Dr. Martin Brandauer 介紹 KIT 除役之研究發展，KIT 自詡從基礎研究開始一路延伸到應用研究，並將技術移轉至產業作為其使命。KIT 有六個院區，核能研究位於校園的南方。其中為核電廠除役所發展用於混凝土牆面的自動刨除設備，可除去牆表面 10mm 水泥，每小時去除面積達 10m<sup>2</sup>。該刨除設備由前述聯邦經濟與能源部經費支持，已於合作開發夥伴 EnBW 之 Obrigheim 核電廠除役過程中試行，目前已技術移轉給廠商進一步改良，EnBW 並承諾將於 Philippsburg 核電廠除役過程中將公開招標使得該設備有機會提供商業服務。

在接下來的實驗室參觀過程中，由 Dr. Martin Brandauer 介紹的其中二項自動化刨除設備研究已分別由西班牙及法國廠商(Orano)提供了 50% 的廠商配合款，廠商可藉此取得研發成果的優先使用權。此二案例說明了 KIT 在研究上的國際化程度以及產業需求符合性。



圖 2 KIT 針對混凝土表面結構研發的除污技術實驗室

### (三)JRC 簡介

歐盟執行委員會聯合研究中心(Joint Research Centre, JRC)係歐盟執委會(European Commission)下的研究單位，於 1957 年成立，有員工約 3000 人，主要職責在於以獨立、遵循科學實證與技術支援的方式給予歐盟政策建議。JRC 分佈於五個國家六個地點：總部比利時布魯塞爾(Brussels)、比利時赫爾(Geel)、德國卡爾斯魯爾(Karlsruhe)、義大利伊

斯普拉(Ispra) 、荷蘭培特(Petten) 與西班牙塞維利亞(Seville)。本次參訪的地點為德國卡爾斯魯爾(Karlsruhe)，其屬於 JRC G 組核能安全&保安(Nuclear Safety & Security)理事會，其下與 4 個研究分部有關，分別位於比利時(Geel) 、德國(Karlsruhe)、義大利(Ispra)以及荷蘭(Petten) ，而各研究分部負責範圍亦有所不同。

#### (四)JRC 除役和核廢管理計劃

此次拜訪 JRC 由 Dr. Vincenzo V. RONDINELLA(義大利輪派駐點)介紹 JRC Karlsruhe 執行的除役和核廢管理計劃 (Decommissioning and Waste Management Programme, D&WMP)。1960 年代 JRC-Geel、JRC-Ispra、JRC-Karlsruhe 以及 JRC-Petten 針對核設施除役可靠性簽署了合作協議，而 D&WMP 則是 1999 年上述 4 個研究分部的共同合作計畫，目前計畫主要活動在 JRC-Ispra 進行，包括非鈾燃料研究、2 座反應爐設施、中低放廢處置設施等，而放廢管理及核設施除役也是 JRC-Ispra 的關注重點。至於 JRC-Petten 具備高中子通量反應爐以及放廢處理能力，JRC-Geel 則擁有 2 座加速器。而 JRC-Karlsruhe 在核材料倉儲、核設施除役及核廢移除、材料開發都有所著墨，例如前述的中低放永久場址 Konrad 未來需要的核廢移動及運營管理都在此進行研究與模擬。

JRC-Karlsruhe 結合了過去 D&WMP 計畫的成果繼續朝研究開發邁進，例如用過核燃料的安全研究。JRC Karlsruhe 主要有熱室(hot cell)，可研究過去遺留下來的放射性燃料，包括高燃耗核燃料/破損核燃料該如何儲存?主要安全考量為何?儲存罐為何?等。JRC 卡爾斯魯厄工廠的核設施在核能保全(security)、燃料安全(safety)及核能安保領域(safeguards)的研發中發揮著關鍵作用，它們同時也用於教育和培訓目的。

不過或許由於 Dr. Vincenzo V. RONDINELLA 是義大利派駐 JRC-Karlsruhe 的代表，當日開會的介紹較為偏重在義大利的在 JRC-Ispra；又或許是當天議題限定除役相關，總之有關 KIT 或 JRC-Karlsruhe 參與歐盟執行委員會資助的計畫只介紹了 D&WMP 計畫。其實歐盟執行委員會資助過許多用過核子燃料的特性研究，其中 KIT 及 JRC-Karlsruhe 有非常深入地參與。

#### (五)KIT/JRC 專家答覆的說明摘要

本次出國參訪前，本參訪團已事先針對 KIT/JRC 在其除役領域之技術及發展進行提問，提問之問題及 KIT/JRC 專家答覆的說明摘要如下：

提問問題	KIT/JRC 回覆說明
KIT 的研究主題如何	KIT 的 Dr. Martin Brandauer 答覆研究主題的訂定主要

決定?	需與 KIT 的長遠目標一致，由 KIT 委員會每 5 年 1 次討論決定主題後，再送聯邦政府審查，其預算 90% 由聯邦政府支助，其餘由合作夥伴支助。
除役時之放射性廢棄物之管制，是否有分為豁免管制 (EXEMPTION) 及解除管制 (CLEARANCE)	<p>JRC 的 Dr. Vincenzo V. RONDINELLA 說明德國核電廠拆除後之放射性廢棄物解除管制標準乃規範於原子能法第七章，詳細內容可參考德國聯邦政府諮詢專家單位 Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) 於 2016 年提交之報告「Guide to the decommissioning, the safe enclosure and the dismantling of facilities or parts thereof as defined in § 7 of the Atomic Energy Act」，上述德國原子能法第七章規範之放射性廢棄物解除管制標準同時也符合歐盟執委會 (EC) 於 1998-2000 年所發布以下三份導則建議，其解除管制標準同為每年 10<math>\mu</math>Sv</p> <p>(1) Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations_89。</p> <p>(2) Recommended radiological protection criteria for the clearance of buildings and building rubble from the dismantling of nuclear installations_113。</p> <p>(3) Practical use of the concepts of clearance and exemption_122 part 1 &amp; part 2。</p>
何種材料物資可回收再利用?	<p>JRC 專家回覆金屬，建築物，其他材料等均可。另根據世界核能協會 (WNA) 資料亦有更清楚的說明，回收和再利用有以下幾種選擇：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ 基本上未被污染且無條件釋放的材料。</li> <li>➤ 可在受監管環境中熔化的材料，然後是消費品的金屬回收（有條件清除）。</li> <li>➤ 具有短半衰期產品的材料，在受監管的環境中熔化和製造，並且可以用於特定的工業應用（例如鋼橋）。</li> <li>➤ 不能從監管控制中釋放但可以在核工業中回收的材料。</li> </ul>
有關廢棄物減容經驗為何?	使用超高壓壓縮機可執行廢棄物減容，但必須有廢棄物接受標準且執行計畫需經管制機關審查同意。

	其他技術包括除污(金屬表面，混凝土剷除及廢液之過濾與凝結)，金屬熔融，有機物之焚化...等等。
針對大型物件如何區別清潔與污染放射性物件並做區隔處理?	依據聯邦輻射防護局(BfS) 於 2012 年發布規範「Requirements for decommissioning and dismantling, treatment and storage in Germany, especially with regard to the management of large components」，通常針對大型物件會先進行輻射特性調查，然後透過各種除污方法以及體積壓縮達到放射性廢棄物減容的目的，至於處理後達到解除管制標準之金屬就進入回收管道再利用。
KIT 與 JRC 均與除役技術的研發有關。兩者在除役技術研發領域上是否有區隔，兩者是為競爭者或合作夥伴? JRC 是否有可能與歐盟外之公司合作	KIT 與 JRC 是緊密的研發夥伴，尤其在歐盟執委會資助計畫中經常合作，但也需要其他不同專長的夥伴，不過不會是以下包方式與其他單位合作，而是在歐盟執委會資助計畫成案階段 (in calls) 就先列出不同專長需求，然後徵求共同提案單位參與。KIT 以及 JRC 的國際合作夥伴不限於歐盟成員國，透過其他多邊或雙邊的跨國合作計畫，也與包括亞洲國家有所合作。
除役費用=15%建廠費用,能否提供除役實際費用項目清單供比較?(6 億歐元/機組 or 8 億歐元/1000MWe)	核電廠除役費用則依每個國家，每種不同機型等各廠狀況有所不同，建議我們可以於歐盟指委會發布之 Nuclear Illustrative Programme (PIN) 資料中進行瞭解歐盟的平均除役成本，不過此成本指包括拆除成本，不包括核廢料的處理成本。另也提醒我們，經驗上，核電廠的拆除常常是政治性考量勝過了技術性判斷。
考量到核能產業的特殊性，以德國經驗來說，要將非核能產業的應用推廣進入核能產業，其主要困難點為何?	經濟效益是最主要因素，業主支付合理的費用，而供應商必須獲得期待中的利潤，另技術上上需考量設備的抗輻射能力及維護保養等因素。
德國的核能除役產業發展是由哪個原有產業的發展帶動起來的?	主要由政治上決定，政策的推動是一關鍵，包括歐盟執委會或是聯邦政府資助計畫支持發展。

### 三、南德 TÜV Süd 集團

此行程主要是參訪南德 TÜV 集團位於司圖加特-菲爾德爾斯塔特 (Filderstadt)，TÜV Süd 長期致力於第三方認證的組織，並作為主管機關的協力組織(TSO)提供管制審查技術之公司之一，故此次的會議亦有德國巴登符騰堡環境、氣候保護暨能源部共同與會，交流德國主管機關進行核設施審查與監管作業之技術發展。

#### (一)巴符邦德國核設施除役許可和監督程序

德國的聯邦核能主管機關為德國聯邦環境、自然保育、及核能安全部 ((德文 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nuklearesicherheit，德文簡稱 BMU，英文為 Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, and Nuclear Safety)轄下的內設機構[核設施安全、輻射防護、核燃料循環司] (Sicherheit kerntechnischer Einrichtungen, Strahlenschutz, nukleare Ver- und Entsorgung，RS) 以及外部的直屬機構[德國聯邦輻射防護局] (Bundesamt für Strahlenschutz，BfS)，共同分工管制核電廠相關政策及法令事務。

德國 2002 年通過非核家園法案(Nuclear Power Phase-Out Act)、以及 2011 年通過再生能源法案(Renewable Energy Sources Act)，預計 2022 年完成所有核電廠的永久停機，而逐步規劃再生能源的使用與住行的電氣化，並承諾 2050 年降低 80%的二氧化碳排放量，以達到永續發展。

2017 年 4 月 25 日，德國成立「放射性廢棄物處置專責機構(Federal Company for Radioactive Waste Disposal, BGE)」，同年的 6 月 16 日，原子能法通過修訂，核電廠的除役、拆除以及放廢的包裝能為電力公司的責任，但放廢的貯存與終存責任移交予聯邦政府。依據此修正法，BGE 接掌聯邦環境、自然保育與核能安全部(BMU)轄下聯邦輻射防護辦公室(BfS)有關執行放射性廢棄物處置的任務。BGE 係受 BMU 監督的 100%國營企業，並依據原子能法接受聯邦政府委託，進行放射性廢棄物處置場建置與營運。另外德國原本由 GNS (Gesellschaft für Nuklear-Service mbH)營運之集中式貯存設施 Gorleben 及 Ahaus 亦於 2017 年 8 月 1 日移交另一國營公司 Federal Company for Radioactive Waste Storage (BGZ)營運。

2017 年原子能的修法以及 BGE、BGZ 的成立對於德國核能界具有劃時代的意義，從此明確定義清楚包括廠內建置中期貯存設施(Intermediate Storage)貯存用過核燃料(電力公司興建完畢後移交給聯邦政府)以及最

終貯存場(址)皆為聯邦政府(BGE)的責任，而費用由電力公司支付，不再有爭議。

德國 BMU 於波昂(總部)及柏林皆有辦公室，在核能方面 BMU 主管核能電廠興建、運轉及除役政策及法令等，若有必要則可提請諮詢委員會(SSK、ESK 及 RSK)或研究機構、專家單位協助提供意見諮詢 (例如 Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH)。

德國巴登符騰堡環境、氣候保護暨能源部核能監管與輻射防護部門主管 Mr.Neihaus 介紹了巴符邦德國核設施退役許可和監督程序。

德國核電廠執照申請審核作業及現場技術監管事務由核能電廠所在地之邦政府相關部門監管，另視技術專業實務需求，轉請技術支援團體 (TSO, Technical Support Organizations) (例如 TÜV SÜD) 認證監督。舉例來說，Philippsburg 核電廠屬德國 EnBW 公司經營、位於巴登-符騰堡邦，於是 EnBW 提送 Philippsburg 核電廠除役計畫至巴登-符騰堡邦環境、氣候與能源工業廳(Baden-Wuerttemberg Ministry for the Environment, Climate and Energy Industry) 審查，取得除役許可後，就正式進入除役階段(Decommissioning Phase)。

與台灣不相同之處是，在德國政府部門組織中，能源與環境是屬於同一部會監管，因此，其在除役執照申請程序中，環境影響評估 EIA 之程序是由巴登符騰堡環境、氣候保護暨能源部自己進行。而並非如在台灣係由業主另行向環保署申請通過後送交原能會。

另外，德國核能監管制度大量依賴 TSO 擔任 third party 來執行現場檢查與評估，以及作為監管機關之技術支援與顧問工作。這是在世界各國很特殊也很成功之一種運作模式。這種運作方式，一方面源自德國以往工業發展過程之演變，另一方面也是目前德國核能監管部門人力不足狀況之結果。此種運用 TSO 來輔助政府監管機關之作法，是正式明訂於德國原子能法之中的。法規明訂，TSO 之合約關係運作是與監管機關之間，而非與執照者之間。但費用需由執照者支付。

## (二)核能設施除役 南德 TÜV SÜD 集團參與經驗

在德國巴登符騰堡環境、氣候保護暨能源部核能監管與輻射防護部門主管 Mr.Neihaus 介紹了巴符邦德國核設施退役許可和監督程序後，隨後由南德 TUV 集團 Dr. Jianming Shang 進行該集團參與電廠除役之經驗簡報。

Dr. Jianming Shang 除先說明上述有關德國在除役執照申請及 TSO 擔任之角色外，首先提到在國際上除役執行策略所包括立即拆除

(DECON)、安全貯存 (SAFSTOR) 和封存 (ENTOMB) 等 3 種，德國聯邦政府原本允許業者選擇立即拆除或是安全貯存，並由邦政府等管制單位負責審查業者所提出的除役計畫內容。但 2 年前聯邦新法頒布後，業者只能選擇立即拆除方式。

德國除役期程約略可分成 Post-operational phase：需 5 -6 年，進行規劃及申照；Dismantling：需 10 -15 年。而以 Obrigheim 核能電廠案例，其拆除步驟順序約如下四大步驟：

- (1) Dismantling phase 1 目標:拆除廠內低污染區的組件。
- (2) Dismantling phase 2 目標:拆除廠內高污染區的組件。
- (3) C. Dismantling phase 3 目標:拆除廠內活化區的組件。
- (4) D. Dismantling 4 目標:拆除廠內其餘的組件。

德國為解決放射性廢棄物的問題，提出核電廠除役、放射性廢棄物中期貯存、至最終處置提出整體解決方案；並於 2017 年生效「放射性廢棄物處置責任調整法」進行權責分野的重組，核電廠除役方面由電力公司營運方負責，在放射性廢棄物貯存與處置方面則由聯邦政府負責，除既有已存在的貯存設施外，亦已規劃在原電廠興建中期貯存設施用以管理除役放射性廢棄物，包括中低放中期貯存與高放貯存。聯邦政府 BfE 刻正負責規劃興建 Konrad 中低放處置場，預計位於既有的 800 米深礦區內，規劃 2027 年啟用，預計 30 年後封存。另德國 2017 年通過高放射性廢棄物的處置設施選址法案(StandAG)，已於 2018 啟動選址程序，預計 2031 年提出場址，2050 年開始運轉。

德國 2018 年依據新法重新啟動選址程序，聯邦政府需擔任放射性廢棄物貯存與處置之責，故德國聯邦中期貯存公司(Gesellschaft für Zwischenlagerung, BGZ)自 2019 年 1 月 1 日起，已接管位於 Lingen 之 Emsland 核電廠(KKE)之用過核燃料中期貯存設施，Lingen 的用過核燃料中期貯存設施可容納 125 個貯存護箱，預估來自 KKE 電廠的用過核子燃料約會放置 85 個貯存護箱；惟此中期貯存設施之 40 年運轉執照期僅到 2042 年，為配合目前德國最終處置場規劃於 2050 年開始營運，故 BGZ 現已規劃相關的研究計畫並預計將於 2030 年提出執照更新申請。

考量多數的除役廢棄物不具有健康危害性，基於輻射防護概念，當確實掌握放射性物質造成的預期曝露情境，在劑量限值安全性、正當性與最適化等因子考量下，德國持續參考國際輻射防護委員會 (International Commission on Radiological Protection, ICRP)與國際原子能

總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)之建議，提出可從法規體系解除管制的劑量標準(Dose Criteria)與清潔水平(Clearance Level)管制值，並於 2001 年發佈輻射防護條例(Strahlenschutzverordnung, StrlSchV)。其中，德國採行的劑量標準與 ICRP 於 2007 年發佈的 ICRP-103 號報告之建議值一致，提出以微小的劑量為基礎建立解除管制劑量標準，亦即指對個人劑量限值為 10  $\mu\text{Sv}$ 、集體劑量為 1  $\text{man-Sv}$ ；同時基於對外釋的放射性廢棄物可採行無條件限制使用與限制性使用，建立預期曝露情節，推導出各個放射性核種之清潔水平管制值，供核電廠作為清潔外釋之量測參考依據。另經查德國 2017 年已合併輻射防護條例、X 光射源防護條例、輻射防護預警條例等並完成輻射防護法(Radiation Protection Act)之立法，亦將同步引進 2013 年 EU BSS 的建議重新檢討清潔水平管制值，如圖 3 所示，圖 4 為變更部分核種解除管制之清潔水平管制值比較，經過這次的修訂，德國之清潔水平管制值亦將與 IAEA RS-G-1.7 相同。有關德國規範外釋之清潔水平管制值(活度或是單位質量活度濃度)可參考 2018 年更新之 StrlSchV 表 1。

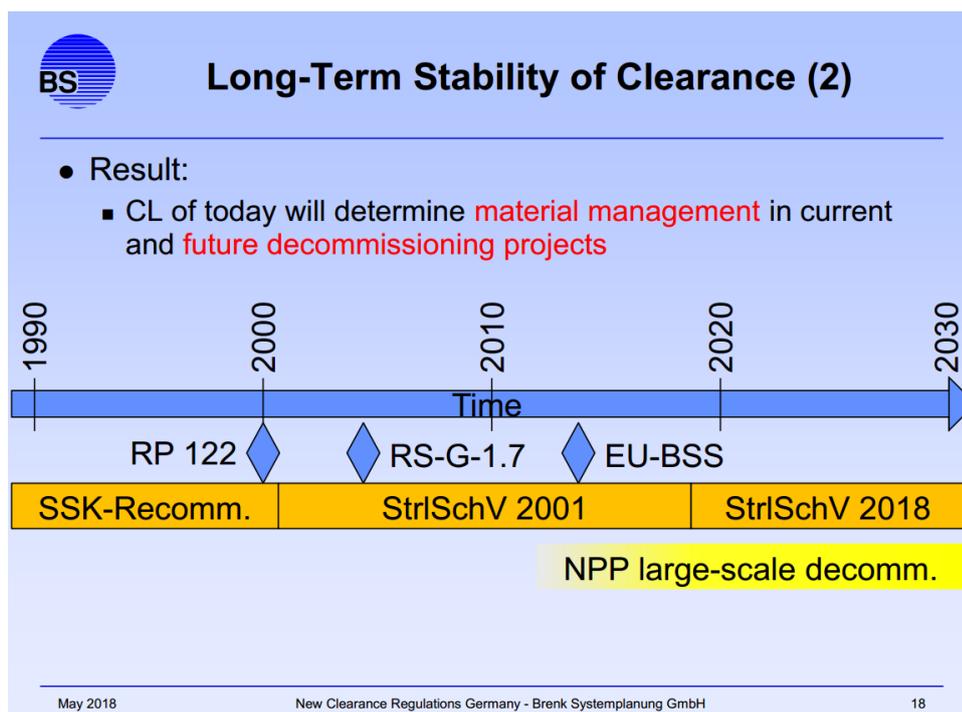


圖 3 德國修訂放射性廢棄物解除管制之清潔水平管制值



## Relevant Changes to CL for Unconditional Clearance

- Changes in CL for selected radionuclides:

Nuclide	App. III Tab. 1 Col. 5 StrISchV	Ann. VII Tab. A Part 1 BSS
<b>H-3</b>	1,000	<b>100</b>
<b>C-14</b>	80	<b>1</b>
Co-60	0,1	0,1
Sr-90+	0,6	1
<b>Cs-137+</b>	0,5	<b>0,1</b>
Am-241	0,05	0,1

- major reductions of CL for:
  - Cs-137+
  - H-3, C-14

May 2018

New Clearance Regulations Germany - Brenk Systemplanung GmbH

20

圖 4 德國於 2018 年變更部分核種解除管制之清潔水平管制值比較

為執行除役廢棄物解除管制之清潔水平活度量測，德國規劃設置廢棄物處理中心。處理中心包括分類、除污、解除管制活度量測、包裝等功能，經過此中心的廢棄物將可被明確區分為需進行後續貯存、處置的低放射性廢棄物、以及可被解除管制工無限制條件之外釋與再利用等。德國預定的 Konrad 中低放射性廢棄物最終處置場已彙整各個除役電廠的建議，提出 8 種包件。

#### 四、Wälischmiller Engineering 公司

**Wälischmiller Engineering**：在全球具六十多年豐富經驗，提供享譽全球具「Made in Germany」品質與可靠性的安全、智慧與具成本效益遠端遙控解決方案。**Wälischmiller** 工程專門製造用於遠端遙控處理系統，在核能與化工業危險環境中可供應用之輻射防護設備與機器人。其負責的專案包含 **Sellafield**（英國塞拉菲爾德）、**Rokkasho**（日本六所村）與 **Chernobyl**（車諾比）等最艱難的核能環境。全公司約有 130 名員工，為一德國中小企業，出產機械手臂(**manipulator**)及遠端遙控機械手臂系統(**TELBOT** 自有品牌)，供應核能電廠及石化工業。

##### (一) 除役作業相關之機械設備介紹

參訪期間由廠方人員介紹各種機械手臂的種類及原理如下：

###### (1) A200 機械手臂:

A200 機械手臂是一個基本型機械手臂分為 **cold arm & hot arm**，**hot arm** 即接觸作業端物件的手臂，如輻射端或高溫端，兩端由齒輪、鍊條或電動馬達帶動。廠方工程師比喻機械手臂原理就像我們腳踏車。有時要補償 **cold/hot** 或 **inside/outside** 兩端位移差距，稱為 **electric offset**，由外操作會有一個時間及動作落差的感覺，這需要透過練習及訓練來彌補。

###### (2) 伸縮式主從機械手 A100:

A100 自 1963 年開始投放市場。系統由 **cold arm**、**implementation** 和 **hot arm** 這三個部分，是當時的一項突破性發展。A100 已迅速成為標準，並且自 **HWM** 改進以來，因此至今仍是市場上最好的處理系統之一。但 A100 不能在水下進行作業。

###### (3) 電動機械手 A100S

A100S 是由經典的 A100 進行改良，其操作臂利用伺服電機的驅動模組所取代。

###### (4) A1000 機械手

A1000 適用於在工作人員無法進入的區域或繁重的工作，特別是在核工業或化工廠。A1000 可在水下進行作業且無使用時間限制。

###### (5) 遠端遙控機械手臂系統(TELBOT)

TELBOT 具有最大靈活性的舉重器，可在所有軸上提供高容量和無限旋轉運動。TELBOT 特別在人類操作員無法工作且必須進行繁重工作的地方展示其實力。例如在核工業或化工廠。

耐輻射端需要選擇耐輻射材料、攝像頭、電纜線等，耐輻射達 1M Gy，這部分測試驗證是與外界合作，公司內並未設置。機械手臂一般舉重 200-500 kg，客製化設計產品可達 1-4 tons。這些系統可裝配在龍門吊車（報價約兩千萬台幣，隨吊重大小而變動）、移動式滑軌、自走車輛及獨立式平台上。其中一種伸縮式機械手臂稱為 Telescope arm，可以深入水中，一般到 10 公尺沒有問題，假如要求更深的工作環境也可以在不同深度裝置不同的密封組件，不但可以滿足更深的工作環境，也可以降低成本。有時用在石化環境，必須考量防爆條件，符合 ATEX category 1 規格。其他特殊精度、切削力和特殊的環境要求，如腐蝕性酸，爆炸性能和輻射水平，都可客製化。Wälischmiller 產品號稱高可靠度、免維護、容易清理。

Wälischmiller 與 EWN (Energiewerke Nord GmbH) 合作，參與德國核電廠除役反應爐切割工作。EWN 使用 A1000 打包機械手臂 (packing manipulator) 夾持切割後鋼塊置入廢料桶，和一個 Telbot 遠端遙控機械手臂系統，該手臂可以夾持雷射切割電擊棒，也可夾持刀具，做為切割手臂 (manipulator for tools)，非常靈活。

EWN 是切割 Reinsburg (東德 VVER) and Greifswald (東德 VVER) 反應爐的主要承包商，其成功使用經驗也搬到了下一個使用地點-- 在 Obrigheim NPP。在 Obrigheim (PWR)，同樣的兩個機械手臂在水池中用來切割上部爐心結構 (upper core structure)，並打包完成。並將這些零組件安全地裝入 Konrad 容器中進行貯存，同時在此過程中也收集樣品以測量確定放射性強度。廠方工程師表示裝置 KWO 機械手臂僅需兩小時。

## (二) Wälischmiller 公司機械應用實績

Wälischmiller 機械手臂廣泛用在核電除役，這些技術已應用在 Greifswald，Rheinsberg 和 Obrigheim 核電廠的除役。此外，Wälischmiller 還參與了卡爾斯魯厄再處理廠的除役計劃。實績有：

- PAMELA Facility in Belgium: Conditioning of high radioactive waste, 1983
- Research Center CEA in Cadarache und Marcoule in France, since 1985

- Decommissioning of the NPP in Greifswald and Rheinsberg Germany, 1999 and 2011
- Kerntechnische Entsorgung Karlsruhe (KTE, former WAK) Germany, since 2010 till today
- Research reactor FRJ-2 in Jülich Germany, 2012
- NPP Obrigheim (KWO)
- Storage management with Drum Gripper, Germany 2018
- Future: Decommissioning of Dragon Reactor, United Kingdom 2019/2020

Wälischmiller 要確定適合每個計劃的工具和方法，第一步是要評估客戶需求，與 Wälischmiller 的技術團隊合作，選擇最具成本效益，最可靠和最安全的解決方案。對於所有計劃，最重要概念始於 ALARA--在操作期間儘可能地減少工人暴露(HWM 簡報提供 KTE 再處理廠經驗值，在工作空間劑量率 > 0.5 mSv/h、拆除元件劑量率 > 100 mSv/h 或高潛在工安、輻安風險作業時採取遙控拆除作業)。客戶需求一般必須提出荷重需求、工作空間限制、輻射及溫度、空氣中或水中等作業環境，現場履勘後即可提出 3D 設計圖供客戶修改。另外詢問廠方工程人員，一般發生損壞的經驗，多發生在超負載(Overload)、或鋼纜線斷裂，一般智慧型手臂因為配置有更多的纜線、感測器及接頭，所以更容易損壞。例如 hot arm 裝置定位感測器，可能可以使定位速度加快，但也增加損壞的風險。

報告後參觀工廠。Wälischmiller 自身擁有機械加工廠，自製所有零配件。購買一般商業化電動機具，去除線圈及內部組件，自行改裝。完整零配件庫自動倉儲管理，強調品質管理，由進貨、設計、組裝到出貨功能測試。

Wälischmiller 在性能，卓越工程和卓越的機器人硬體方面享有盛譽。在最困難和最具挑戰性的核環境中，Wälischmiller 已經證明能夠為許多最困難的高輻射修復挑戰提供解決方案和成功。Wälischmiller 在德國核電廠商業除役的各個方面擁有豐富的經驗。使用實績包括手動操作機械手、半自動方法和全機器人系統。這些手臂並擁有智慧學習的特徵，包括使用“示教和重複”的學習功能，以及力反饋功能。

其產品包括使用簡單的機械手臂，如型號 A100、A200，以及電動操縱機械手臂，如 A1000 和 Telbot。其應用可以實施乾切割、濕切割和收集高達 1000 磅的碎片，以及擺置和控制打包，在高輻射環境中這種類型的精準工作，是必要不可少的功能。切割可以是熱切割和機械切割。熱技術包括雷射、Plasma 和水下接觸弧金屬切割 (CAMC, contact

arc metal cutting)。機械技術主要是剪力切、盤鋸和沖床。



圖 5 與 Wälischmiller Engineering 合影

## 五、德國西屋公司(Westinghouse Electric Germany GmbH)

3 月 25 日上午拜訪位於德國南部巴登-符騰堡邦境內的曼海姆(Mannheim)的德國西屋電氣公司，地點與 TÜV SÜD 曼海姆辦公室相鄰。

### (一) 西屋公司簡介

美國西屋電氣公司(Westinghouse Electric Company)創立於 1886 年，而德國西屋電氣公司前身為 1971 年成立的 Babcock Brown Boveri Reaktor GmbH (BBR)。BBR 公司於 1973 年被美國西屋電氣公司收購，1987 年西屋電氣公司被賣給瑞士 Brown Boveri Inc. (BBC)，1988 年 BBC 與瑞典 ASEA 公司合併成立 ABB 公司，西屋電氣公司開始併入 ABB 集團，仍然稱為西屋電氣公司。1998 年西屋電氣公司發電部門賣給了 Siemens (併入 Siemens)。2000 年西屋的核電事業被轉賣給英國 British Nuclear Fuels (BNFL)公司，仍維持西屋電氣公司的名稱，2006 年又被 BNFL 轉賣給日本東芝(Toshiba)，2018 年加拿大 Brookfield 資產管理公司收購了 Toshiba 所有西屋電氣公司股權；核一廠的汽機係由西屋電氣設計，低壓汽機葉片更新以及主冷凝器真空之蒸汽抽氣系統也是由合併之後的 ABB 公司設計改善的，因此西屋電氣公司與核一廠有著相當密切的合作關係。

西屋電氣公司現階段分為四個主要的部門，分別為服務 (Nuclear Services)、燃料 (Nuclear Fuel)、核電廠 (Nuclear Power Plant) 及自動化 (Nuclear Automation)，其中核設施除役及廢棄物處理之相關業務是由服務部門負責，此部門在美國、比利時、德國、法國、瑞典、西班牙、中國大陸、日本以及南韓等地均設有分部，其中亞洲約有 500 名員工。

### (二) 除役相關經驗

西屋電氣公司在核電廠除役的相關能力，包括核電廠與核設施除役規劃、反應器壓力槽內部組件 (RPV Internals) 移除、主要組件拆除、除役之除污作業、廢棄物處理設施的設計與建造，以及拆除活動管理規劃等。

西屋電氣公司非常自豪為一家核能公司，過去以設計壓水式反應爐 (PWR)聞名，在與瑞典 ASEA 公司合併的過程中，將 ASEA 公司關於沸水式反應爐(BWR)的專業整合成為西屋電氣公司的能力，這對於西屋電氣公司能爭取到沸水式反應爐(BWR)型式的 Philippsburg 核電廠 1 號機受活化部件相關的 4 個拆除標案有極大的幫助。

西屋電氣公司在核電廠除役領域擁有的豐富的技術與經驗，包括執行西班牙 Zorita 核電廠爐體的除役拆解工作、以及執行南德巴登-符騰堡邦境內 Philippsburg 核電廠 1 號機(BWR)受活化部件的拆除、在 Philippsburg 核電廠 1 號機的合約工作範圍包括規劃、設備製造、以及廠區內反應爐及內部組件的切割拆除等，由西屋電氣公司、Nukem Technologies 及 GNS 公司組成的聯盟來執行，主導公司為西屋電氣公司，其負責擬定最佳化切割策略，Nukem Technologies 負責工程專案管理，GNS 公司提供包括向管制機關申請動工核可之文件準備、切割後組件樣本分析、切割後組件裝載等服務。

因應反應器及內部組件的分解工項切割最佳化的目的，西屋電氣研發設計相關的切割工作平台、輔助工作吊臂、輔助支撐臂等設備；在溝通過程中，西屋電氣也分享其水下作業之經驗回饋，針對部分水下作業工項，有時花了很多時間、金錢研發切割的設備，但最終的利益卻極為有限，經常只是時間的縮短，因此在意見溝通時提及，有些水下作業，簡單的設計反而是最有效的。

西屋電氣公司在台灣也參與許多核能除役技術服務工作，包括「核一廠除役許可申請及除役作業規劃工作」以及「核二廠乾貯案技術支援工作」技術服務二項計畫，因計畫需求皆委託瑞典西屋電氣公司協助工程管理與排程規劃及廢棄物盤點估算工作。

## 六、Philippsburg 核電廠

Philippsburg 核電廠屬德國 EnBW 公司經營的核電廠之一，共 2 部機組，1 號機為 1979 年商業運轉之沸水式反應器，電力輸出 926 MWe，於 2011 年日本福島事故後依政府政策停止運轉；2 號機為壓水式反應器，電力輸出 1,402 MWe，根據德國原子能法將運轉至 2019 年 12 月 31 日。本次參訪主要針對該廠已完成的二大部分除役工作交流：

### (一) Philippsburg 核電廠除役概況

參訪期間由 EnBW Kernkraft GmbH (EnKK 公司)負責所有 EnBW 核電廠除役策略及整體管理的 Mr. Wolfgang Hentschläger 介紹 EnBW 核電廠除役概況。Philippsburg 核電廠 1 號機屬於德國最早的八部核能機組之一，自 2011 年日本福島電廠事故後，即配合政策進入除役過渡階段 (Transition Phase)。EnBW 公司於 2013 年 5 月向巴登-符騰堡邦政府正式提出除役與拆除許可申請。

2016 年 2 月，EnBW 收到 Philippsburg 核電廠 1 號機之除役基礎設施建造許可證，開始建造廢棄物處理中心(Waste Treatment Center)與臨時廢棄物貯存設施，預定今年可完成開始使用。

2017 年 4 月 11 日 EnBW 獲得巴登-符騰堡邦環境、氣候與能源工業廳 (Baden-Wuerttemberg Ministry for the Environment, Climate and Energy Industry)所簽署 Philippsburg 核電廠 1 號機的除役與拆除許可，正式進入除役階段(Decommissioning Phase)。

參訪期間詢問 EnBW 總共提撥多少經費作為核電廠除役基金，Mr. Wolfgang Hentschläger 表示 EnBW 公司對於 Obrigheim 核電廠、Philippsburg 核電廠 1、2 號機及 Neckarwestheim 核電廠 1、2 號機共 5 部機組，預計以 50 億歐元的經費完成所有除役工作。另外 EnBW 公司亦已提列 50 億歐元準備移交聯邦政府運用處理該 5 部機組的放射性廢棄物。

### (二) 反應器及內部組件除役拆解現況

由 EnKK 公司負責 KKP 1 除役專案管理的 Mr. Florian Wolff 說明電廠受中子活化組件；包括反應器及內部組件除役拆解的工作，分別以 4 個招標案進行公開招標；由於西屋電氣公司投標前充分與 Philippsburg 電廠員工溝通並且合作產出符合公司期待的服務建議書，故西屋電氣公司所主導的企業聯盟取得了所有的合約。其中 Philippsburg 1 號機之拆除合約由其業主 EnBW 電力公司的子公司 EnKK 公司負責招標，工

作範圍包括規劃、設備製造、以及廠區內反應器及內部組件的分解等。整個合約是由西屋電氣公司、Nukem Technologies 及 GNS 公司所組成的聯盟來執行，由西屋電氣公司主導並負責擬定最佳化切割策略，Nukem Technologies 負責工程專案管理，GNS 公司提供包括向管制機關申請動工核可之文件準備、切割後組件樣本分析、切割後組件裝載及紀錄管理等服務；切割後的盛裝容器型式是由巴登-符騰堡邦政府、EnBW、RWE 等核電公司共同討論決定，盛裝容器之盛裝數量則由得標商於投標時建議並列入評比分數，至於盛裝容器採購則由 EnKK 直接對 GNS 公司進行發包。

Mr. Florian Wolff 提到德國核電廠除役與拆除經驗已經日趨熟稔，過去 Greifswald 核能廠(KGR 1-5)的除役及拆除計畫審查需要分為 10 個階段分別向邦政府遞送；而 Obrigheim 核電廠於 2008 年執行時分為 4 個階段分別向邦政府遞送；Philippsburg 核電廠 1 號機於 2013 年申請時已進步到只分為 2 個階段遞送。後續 Philippsburg 2 號機 EnKK 公司準備一次送件就希望能夠完成審核。

EnKK 準備在移除 Philippsburg 核電廠 1 號機的冷卻水塔後，原地改建成直/交流變電站，將德國北方陸域風力發電的電引接於此，用以填補因該部機組除役後留下的電力缺口。變電站工程預估 2022 年完工啟用。

由於目前德國尚未有最終處置場可接收核能電廠所產生之高階放射性廢棄物與中低階放射性廢棄物，因此 Philippsburg 核電廠於廠內建置中期貯存設施(Intermediate Storage)貯存用過核燃料，根據 2017 年通過的法律，電廠預定於 2020 年 1 月將此中期貯存設施移交給聯邦政府。德國對於高放射性及中程度放射性廢棄物分由電力公司及政府分層負責儲存與運送。

電廠除役拆除產生大量的中低階廢棄物，經 EnBW 評估現有廠區貯存空間不足，為確保電廠除役拆除作業可持續且快速完成，故在廠區內建置廢棄物處理中心(Residual Material Treatment Center，簡稱 RBZ)與廢料貯存設施(On-site waste storage facility，簡稱 SAL)，除役拆除設備組件將於廢棄物處理中心進行細部切割、除污及分類，減少放射性廢棄物產量，再將放射性廢棄物貯存於廢料貯存設施。參訪期間 RBZ 與 SAL 設施正在施工中，預計於 2019 年 7 月完工啟用

Mr. Florian Wolff 說明有關除役現場拆除作業管理部分，EnBW 公司於電廠內可拆除設備會噴上粉紅色漆，使現場拆除工作人員可易於辨別設備是否可拆除。

最後由 EnBW 專門負責回收與除污的另一子公司 EnBW GNR Reststoffrecycling mbH 技術經理 Mr. Sven Gärtner 介紹現場組件除污的方法。除污程序主要有清洗(washing)、噴砂(sandblasting)、及超音波浴(ultrasonic bath)。

## 肆、心得與建議事項

因本公司核一廠將於今年進入實質除役階段，未來核二廠及核三廠也將陸續進入除役階段，故希望能透過此次國際除役技術交流機會，了解國際於除役作業上之相關作法並從中學習除役關鍵技術與經驗，有助除役計畫之推動與執行

本參訪團已於出國前召開多次行前會議，了解參訪機構之背景、專長領域及其除役相關實務經驗與計畫發展情形，擬定除役技術交流討論會內容與目標，包含核電廠除役工作規劃方向與執行、除役拆除作業相關機械設備之應用、放射性廢棄物管理、及與核能管制單位溝通等議題，並事先擬定 Q&A 請德方預擬答覆，使討論會能更有效率進行，除役技術交流更臻完善。

本次出國參訪心得與建議事項如下：

(一) 參訪 Obrigheim 核電廠時，Dr. Oliver Wilhelm 根據 EnBw 公司於除役作業上之實務經驗，並考量本公司目前除役作業執行現況，提出以下建議供作參考：

- (1) 總顧問包需注重進度管理最優化及過程安排最適化。
- (2) 拆除作業進行，工作人員極少化，拆除工具簡單化，不需追求高科技安裝操作費時的設備，但要符合輻防規定。
- (3) 設備拆除後除污前之儲存緩衝空間要極大化規劃，因拆除速度比除污速度快，以免空間堵塞而無法再拆除設備。

(二) 與輻射防護方面：

參考德國除役經驗，除役過程中多數的除役廢棄物不具有健康危害性，但基於輻射防護概念及輻防法規之劑量要求，於進行各項除役作業時，仍須確實掌握放射性物質造成的預期曝露情境，針對劑量限值安全性、正當性與最適化等因子進行考量，訂定輻射防護措施，使除役工作安全進行，確保工作人員於除役活動期間之輻射安全。

(三) 在德國明確定義清楚包括廠內建置中期貯存設施(Intermediate Storage) 貯存用過核燃料(電力公司興建完畢後移交給聯邦政府)以及最終貯存場(址)皆為聯邦政府的責任，而費用由電力公司支付。而依據此明確分工，不管是負責低放最終處置設施還是高放最終處置設施建置之政府部門，均已立下下期程努力推動。此點，我國目前正想要推動成立之「行政法人放射性廢棄物管理中心」專責機構與其相同。建議應持續

努力推動，使放射性廢棄物之處置找到可解決之途徑。

(四) 於除役拆除作業機械使用方面:

根據本公司除設計畫規劃內容，除役拆廠階段將會面臨大量設備拆除工作，此時如何選擇適當拆除工具，使拆除作業順利進行，便是重點工作項目之一。根據此次 Wälischmiller 公司參訪經驗，該公司為因應各種拆除作業而研發多種不同機械設備，可根據現場需求進行替換使用。

因此，除考量不同拆除作業之特性選擇適當機械設備，也須依實際作業現場情況適時進行調整以符合作業需求。此外，拆除工具之選擇也須考量後續放射性廢棄物處理等相關議題，故除役拆除作業相關機械設備之選擇與使用，仍須透過學習國際間同案例之實務經驗，並與業界及相關研究機構進行多方交流討論，來選擇最適切之方案，使拆除作業順利進行。

(五) 於放射性廢棄物處理方面:

在本次參訪期間，透過與德國核後端營運業者及技術專家進行之技術交流討論，了解本公司於放射性廢棄物減容及除污方面已具有相當成效及成熟之技術能力，因此如何與我國管制單位溝通及討論放射性廢棄物管理之相關作法及法規要求，則是未來重要工作項目之一。

(六) 除役產業鏈發展方面:

(1) 廢棄物處理場所(WMF)部分:

經由參訪德國核電廠(Obrigheim、Philippsburg)的過程，了解德國電力公司(EnBW)評估現有廠區貯存空間不足，而為確保電廠除役拆除作業可持續且快速完成，故在廠區內建置廢棄物處理中心(Residual Material Treatment Center，德文簡稱 RBZ)與廢料貯存設施(On-site waste storage facility，德文簡稱 SAL)。這與核一廠未來要建置「廢棄物處理場所」(WMF)的做法一致，本公司已初步與國內產學單位或工程公司進行討論，並連結國內切割設備產業&補助設備廠商、除污設備產業、自動化倉儲與物料搬運系統產業、產線自動化手臂產業、無塵室廠房製造產業及大型輻射偵測設備產業...等，以完成「核一廠 # 2 汽機廠房 3 樓實驗型除役廢棄物管理設施(WMF)建置」。未來在除役拆廠階段可依此經驗建立核一廠之除役廢棄物管理設施(WMF)的建置。

## (2) 大型輻射偵測設備

參考德國除役電廠 KWO 及 KKP1 的經驗，廢棄物經處理後，要外釋前均有大型輻射偵測設備做最後的把關，目前核三廠已有類似大型輻射偵測設備，核一廠未來將視 WMF 運作需求規劃大型輻射偵測設備規格及建置。

## (3) 系統除污

參考 KKP1 執行全系統除污之經驗，該電廠使用 Westinghouse Nitrox-E 除污技術將 RPV 劑量由 393 $\mu$ Sv/h 降為 12 $\mu$ Sv/h，目前核一廠除役計畫已預規劃全系統除污，但未來將視用過核子燃料退出爐心之時機及停機時間之長短，考量除污成本、效益及後續產生之放射性廢棄物處理等因素，評估核一廠是否須進行全系統除污。未來核一廠進行除役除污作業時，可參考國內核能機組大修時之運轉除污經驗及核三廠蒸汽產生器化學清洗自主化的成功經驗，搭配台電相關單位、其他研究機構及國內機械產業，建立化學除污系統、循環、監測、過濾及廢料廢水處理模組化設計及製造能力，可後續在其他核能機組有效完成除污工作。

## (4) 盛裝容器

德國目前已由巴登-符騰堡邦政府與 EnBW、RWE 等核電公司共同討論決定切割後之盛裝容器型式。如此，待未來最終處置設施確定時，可確保能直接轉運至最終處置設施。

本公司將參考德國的作法並依我國相關法規之要求規劃設計並申請盛裝容器使用執照，未來可直接貯存至最終處置設施。

## (5) 機械手臂遠端遙控

德國 Walischmiller Engineering 公司的機械手臂已廣泛應用在 Greifswald、Rheinsberg 和 Obrigheim 核電廠的除役及卡爾斯魯厄再處理廠的除役計劃中。惟大都使用於高輻射區，另參考 Obrigheim 核電廠時 Dr. Oliver Wilhelm 的建議，拆除作業進行時，拆除工具簡單化(Simple system, Simple do)，不需追求高科技安裝操作費時的設備，但要符合輻防規定。

因此未來本公司進行除役作業時，須先盤點高輻射區的機械手臂需

求，並視現場作業需求採購及建置自動化機械手臂。另核一廠今年要進行的「核一廠 #2 汽機廠房 3 樓實驗型除役廢棄物管理設施 (WMF) 建置」，已考慮安裝一個新的機械手臂，來控制核一廠現有的高壓噴水除污裝置，以建立先導型除污間，進行除污展示。

#### (6) 除役產業鏈的發展藍圖

國外的除役產業均先以實驗型反應器的拆除經驗奠定基礎，再進一步發展到商業型核電廠的除役，德國亦是如此。國內目前核能研究所正進行 TRR 實驗型反應器的除役工作，並業已開發許多技術，建議台電應參考國外之經驗，加強與核能研究所及工研院密切合作，吸取核能研究所 TRR 實驗型反應器的除役技術與經驗，開發應用屬於核一、二、三廠之除役技術，共同發展成為除役國家團隊的一員。