

出國報告（出國類別：考察）

赴瑞典考察除役低放射性金屬廢棄物 處理回收設施

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：丁 宇 組長

林上仁 經理

派赴國家：挪威、瑞典

出國期間：106 年 02 月 05 日至 02 月 16 日

報告日期：106 年 04 月 12 日

出國報告審核表

出國報告名稱：赴瑞典考察除役低放射性金屬廢棄物處理回收設施		
出國人姓名(2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
丁 宇	除役組長	核後端處
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)	
出國期間：106年02月05日至106年02月16日		報告繳交日期：106年04月12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 type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告
<input checked="" type="checkbox"/>	<input 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 type="checkbox"/>	3.無抄襲相關資料
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	4.內容充實完備.
<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	5..建議具參考價值
<input checked="" 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"/>	(7) 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔
<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),與同人進行知識分享。
<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： _____ 主管處： _____ 總經理： _____
 主管： _____ 主管： _____ 副總經理： _____

說明：

- 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 二、審核作業應於報告提出後二個月內完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務報告資訊網為原則」。

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：赴瑞典考察除役低放射性金屬廢棄物處理回收設施

頁數 34 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/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

丁 宇/台灣電力公司/核後端處/除役組組長/(02)2365-7210 轉 2240

林上仁/台灣電力公司/核能一廠/維護經理/(02)2638-3501 轉 3350

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他：國際會議

出國期間：106 年 02 月 05 日至 02 月 16 日 出國地區：挪威、瑞典

報告日期：106 年 04 月 12 日

分類號/目

關鍵詞：除役廢棄物

內容摘要：(二百至三百字)

核電廠除役過程將產生大量低放射性金屬廢棄物，如何加以適當分類處理並將有用物質回收再利用，以大幅減少除役廢棄物產量及降低後續處置成本，為核設施除役之重要課題。位於瑞典之 CYCLIFE 公司為放射性金屬廢棄物處理回收之國際專業機構，為瞭解國際核能業界針對核能除役所產生的金屬廢棄物，如何適當分類處理並將有用物質回收再利用，以減少廢棄物產量及降低處置成本，赴瑞典 CYCLIFE 公司考察金屬廢棄物處理回收之技術與設施。

兼顧除役作業安全及效率為國際核能除役業界一致追求的目標，亦為本公司目前執行除役規劃與準備之重要原則。為與國際除役資訊接軌並精進除役之策略擬訂與作業規劃，擬利用本次赴瑞典考察順道前往挪威參加能源科技研究院(Institute for Energy Technology, IFE)與 OECD 國際核能署(NEA)及國際原子能總署(IAEA)聯合舉辦的「兼顧除役安全及效率之現階段與發展中核能除役方法研討會」研討會，以汲取國際業界提升除役安全及效率之知識與經驗，將有助於強化本公司核電廠除役準備工作之推動。

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

目 錄

一、目的	1
二、過程	2
(一)兼顧除役安全及效率之現階段與發展中核能除役方法研討會	
(二)考察瑞典 CYCLIFE 公司金屬廢棄物處理回收技術與設施	
三、心得	7
四、建議	27
五、附錄	29

一、目的

核電廠除役過程將產生大量低放射性金屬廢棄物，如何加以適當分類處理並將有用物質回收再利用，以大幅減少除役廢棄物產量及降低後續處置成本，為核設施除役之重要課題。核後端處依除役督導會報決議，仿效WPDD成立低階放射性廢棄物最佳化管理之任務小組，進行深入研究探討。位於瑞典之CYCLIFE公司為放射性金屬廢棄物處理回收之國際專業機構，為瞭解國際核能業界針對核能除役所產生的金屬廢棄物，如何適當分類處理並將有用物質回收再利用，以減少廢棄物產量及降低處置成本，赴瑞典CYCLIFE公司考察金屬廢棄物處理回收之技術與設施。

能源科技研究院(Institute for Energy Technology, IFE)與OECD國際核能署(NEA)及國際原子能總署(IAEA)於挪威聯合舉辦的「兼顧除役安全及效率之現階段與發展中核能除役方法研討會」，研討主題包括：(1)國際間進行中及已完成除役計畫之經驗回饋；(2)國際合作的需求與機會以精進除役方法；(3)國家除役法規與國際除役作業指引；(4)國際核設施除役知識彙集與傳播分享；及(5)進行中及未來之核設施除役研發需求。兼顧除役作業安全及效率為國際核能除役業界一致追求的目標，亦為本公司目前執行核一廠除役規劃與準備之重要原則。為與國際除役資訊接軌並精進除役之策略擬訂與作業規劃，擬利用本次赴瑞典考察順道前往挪威參加研討會，以汲取國際業界提升除役安全及效率之知識與經驗，將有助於強化本公司核電廠除役準備工作之推動。

二、過程

(一)、出國行程

此次出國行程先赴挪威參加IFE、OECD-NEA及IAEA聯合舉辦的「兼顧除役安全及效率之現階段與發展中核能除役方法研討會」，再前往瑞典CYCLIFE公司考察金屬廢棄物處理回收之技術與設施。

1. 106年02月05~06日 往程 (台北－挪威奧斯陸)
2. 106年02月07~09日 參加「兼顧除役安全及效率之現階段與發展中核能除役方法研討會」
3. 106年02月10日 交通行程(挪威奧斯陸→瑞典斯德哥爾摩)
4. 106年02月13~14日 考察除役低放射性金屬廢棄物處理回收設施
5. 106年02月15~16日 回程(瑞典斯德哥爾摩－台北)

(二)、研討會及考察過程

1. 參加兼顧除役安全及效率之現階段與發展中核能除役方法研討會



圖一、研討會開幕全體與會人員合影

(1)研討會開幕與簡介

由OECD NEA執行秘書Inge Weber說明OECD NEA除役組織之國際觀點(如圖二)，及IAEA針對除役先進技術所提供之國際支援，並由OECD介紹HRP(Harden Reactor Project)計畫相關除役研究與運用成果(如圖三)。



圖二、OECD NEA執行秘書Inge Weber專題演講



圖三、OECD 介紹 Harden Reactor Project 除役研究與運用

(2) 進行中及已完成除役計畫之經驗回饋

由AREVA德國分公司介紹瑞典SVAFO R2及R2-0反應器之除役與拆廠經驗。中國原子能科學研究院(CIEA)說明其位於北京之重水式研究型反應器(Heavy Water Research Reactor ,HWRR)之除役挑戰，該反應器於2007年永久停機，該設施之反應器廠房控制室及生物屏蔽混凝土牆保留不拆，除役分成三期計畫；芬蘭之VTT技術研究中心之FiR1 TRIGA 研究型反應器計畫。烏克蘭車諾比爾除役之過去、現在與未來；日本JAEA報告除役中普賢電廠之除役經驗；立陶宛Ignalina電廠以運轉員觀點看除役之挑戰。

WDPP除役輻射特性化任務小組Arne Larsson介紹國際輻射特性化優良典範；荷蘭NRG(Nuclear Research and consultancy Group) 報告PETTEN研究型低中子通量反應器除役進度；蘇俄State Research Center, Federal Medical Biophysical Center(SRC-FMBC)報告車諾比爾事故和福島事故後減輕公眾暴露於放射性碘的對策的比較分析(評估甲狀腺劑量)。

(3) 精進除役方法與新技術國際合作的需求與機會以精進除役方法

Michele LARAIA, IAEA說明核子設施除役研發之演進；Christian TOPF, AREVA, Germany介紹其化學除污技術(2011~2016年執行之計畫)與實績；瑞典的Studsvik簡介使用核種向量(nuclide vector)和核種特性測量進行鈾燃料設施中的廢棄物特性化，及以MARSSIM方法結合參數統計進行斯德哥爾摩Karolinska大學醫院腫瘤研究治療中心的輻射特性最佳化和清除過程。

(4) 除役相關之資訊技術

蘇俄 SRC-FMBC 報告以環境劑量測量進行表面污染活性重建；IAEA 介紹福島第一核電廠除役燃料碎片取出技術；斯洛伐克共和國 KIND Consultancy 介紹維也納 TRIGA MARK-II 試驗研究型反應器的標準化除役成本計算工具之比較；日本 JAEA 報告除役中普賢電廠資訊技術發展經驗；IAEA 介紹核子放射性緊急事故的評估工具；OECD Halden Virtual Reality Centre (HVRC)介紹以 VRdose Planner 應用可行性研究評估；IAEA 介紹福島一廠爐內碎片取出先進技術。

(5) 改進除役作業之挑戰與方法

EPRI 介紹其除役作業之研究與發展中之專案；法國 IN Solution 以核子設

施 正常停止運轉後及福島一廠發生事故之電廠討論研發和創新來應對核設施除役的挑戰(以核子設施正常停止運轉後及福島一廠發生事故電廠); 斯洛伐克共和國 KIND Consultancy 說明核子設施收集運轉數據與資料對除役之新需求; 蘇俄 SRC-FMBC 報告蘇俄核子設施人員估算體外輻射曝露聯辦法規準則; 法國 EDF-DP2D 介紹 EDF 建議發展之石墨廢料中長半衰期 C1-36 評估; 英國曼徹斯特大學介紹放射性石墨廢料管理的創新方法。

2. 考察瑞典CYCLIFE公司金屬廢棄物處理回收技術與設施

本次出國任務的主要行程為赴瑞典CYCLIFE公司考察金屬廢棄物處理回收技術與設施。CYCLIFE之前身為瑞典Studsvik，後於2016年間為法國EDF公司併購後更名為CYCLIFE。瑞典CYCLIFE的廢金屬熔煉回收設施自1988年(Studsvik時期)即開始接收核能業界委託處理的廢棄大型組件。累積近30年之處理經驗，據瑞典CYCLIFE人員表示，對於來自BWR電廠如熱交換器和汽渦輪機殼等大型組件之熔煉回收處理，已屬於常規業務。



圖四、瑞典CYCLIFE公司進行低放射性廢棄物處理回收設施簡報

本次觀摩行程由瑞典CYCLIFE公司技術部門主管Arne Larsson及業務部門主管Björn Amcoff接待及解說，進行過程首先於CYCLIFE公司會議室聽取兩位主管對EDF公司旗下所屬的瑞典CYCLIFE公司有關低放射性廢

棄物處理回收設施的簡報說明，並進行初步交流研討(如圖四)。接續進行現場低放射性廢棄物處理回收設施之觀摩，包括廢金屬熔煉回收設備、焚化爐、以及高溫裂解爐。過程由Björn Amcoff先生陪同及解說，由於參訪過程禁止攝影，只能從解說內容中加以記錄與整理。現場參訪過程結束後再度回到會議室進行研討，由Arne Larsson及Björn Amcoff 兩位主管帶領，同時邀請Studsvik時期的資深技術人員到場，共同參與討論及回答提問。兩天的考察活動，在加深台電以及瑞典CYCLIFE對彼此的瞭解過程中順利結束。

三、心得

✚ 參加兼顧除役安全及效率之現階段與發展中核能除役方法研討會

此次參加 Institute for Energy Technology, IFE 與 OECD-NEA 及 IAEA 聯合舉辦的「兼顧除役安全及效率之現階段與發展中核能除役方法研討會」的心得如下：

(一)除役工作發展和進步較快領域

1. 技術和工具：如本次研討會發表之案例：

- 以數位化自動輻射顯影技術進行 α 及 β -emitter 等難測核種之量測(New developments of autoradiography technique to improve alpha and beta, PASCAL FICHET,CEA,France)，以磷光閃爍體 BaFBr:Eu²⁺顯示屏量測 α 及 β -emitter，再配合數位自動顯影技術進行區域核種判別。

特性調查及外釋過程以 MARSSIM 結合參數統計學進行最佳化(How characterization and clearance process is planned to be optimized by combining MARSSIM methods with parametric statistics in decommissioning of Karolinska University Hospital in Stockholm, Jonatan JISELMARK, Studsvik Consulting AB, Sweden)

- 廢棄物裝桶方法：如依成本、活度、體積、重量以 Bin packing problem 組合數學規劃 160 束控制棒裝桶(Application of constraint satisfaction algorithms for conditioning and packaging 160 control rod assemblies, Dr. Philip J. Harding, Brenk Systemplanung GmbH)

2. 特性調查(越早開始越好)：NEA WPDD 於 2010 年開始”核子設施除役輻射特性調查策略 Strategies for Radiological Characterisation in Decommissioning of Nuclear Facilities”專案，以整體生命週期而言，輻射特性化自建廠與申照階段開始，經運轉、過渡期、拆除廠址復原皆須做輻射特性調查，進行資料收集與評估(International good practice on practical implementation of characterization in decommissioning, Arne LARSSON, WPDD Task Group on Radiological Characterization and Decommissioning)。

3. 全面的規劃學習與經驗交流：如 OECD-NEA TAG 會議及此次 IFE-HRP 之 workshop

4. 協助除役之公司：如 AREVA、Studsvik、WESTINGHOUSE、EDF 等

5. 除役之模擬：如本次研討會發表之案例日本普賢電廠以 3D-CAD System and Simulation 進行電廠廠房及反應器切面模擬；視覺化效果如管路、熱

交換器拆除排程(Visualization of Dismantling Schedule)、區域活度顯示；Virtual Reality System 如拆除模擬、規劃訓練及 VRdose)等與資料庫連結。

6. 拆解技術的成熟
7. 使用伽馬顯影和可攜式光譜儀
8. 遙控操作（但仍然昂貴和應用有限）

(二)預期在即將除役工作中面臨的主要挑戰

1. 除役資源：市場形勢和承包商，除役工作與數量增加，依 IAEA 統計全世界迄今超過 400 個核子設施，含研究型反應器、商業型反應器和核燃料處理廠已經停止運轉、進行除役、或已完成拆除。
2. 為除役工作培育年輕一代
3. 廢物處理和最終處置庫的包裝標準：如此次研討會 AREVA 為 SVAFO-R2 實驗型反應器進行拆除、切割與包裝，拆除後之包裝標準 Waste Route WR1 為 dose rate >2 Sv/hr, WR2 為 2mSv/hr $<$ dose rate <2 Sv/hr, WR3 為 dose rate <2 mSv/hr 詳下圖
4. 廢棄物包裝最佳化：如前述 Bin packing problem 組合數學規劃 160 束控制棒裝桶最佳化
5. 國際合作：廢棄物送他國處理
6. 自除役公司取得資訊：如化學除污、切割、拆除等技術為提供技術公司之智慧財產權，故僅會提供其技術服務之成果，不提供詳細設計資料供除役電廠參考比較。
7. 如何降低成本。

(三)研究型 and 商業型反應器間的經驗交流分享

1. 研究型反應器：通常做更多的測量實驗，開發更多的技術。
2. 商業型反應器：電廠較研究型反應器有更多後勤物流的問題，組織的優先次序不同，研究型反應器的組織人員通常留在原地，較無時間和成本壓力；管制機關對兩者之要求與關切程度不同。

(四)由過去除役發生事件的經驗學習

除役期間需要更好輻射防護的意識；除役需要更詳細與多面向規劃；需要更多不同的培訓；除役未做好輻射特性化易發生事故；在電廠內即有支援系統之故障；系統的除污可能有非預期性的結果，可能重複或者產出比預期更多的放射性廢物。

(五)除役經驗的分享與建議

依此次研討會的交流發現，除役訊息共享通常不是很詳細，協助除役公司技術與經驗因智慧財產因素而無法讓除役電廠充份了解；除役成本估算訊息的不足，皆造成除役工作困難。

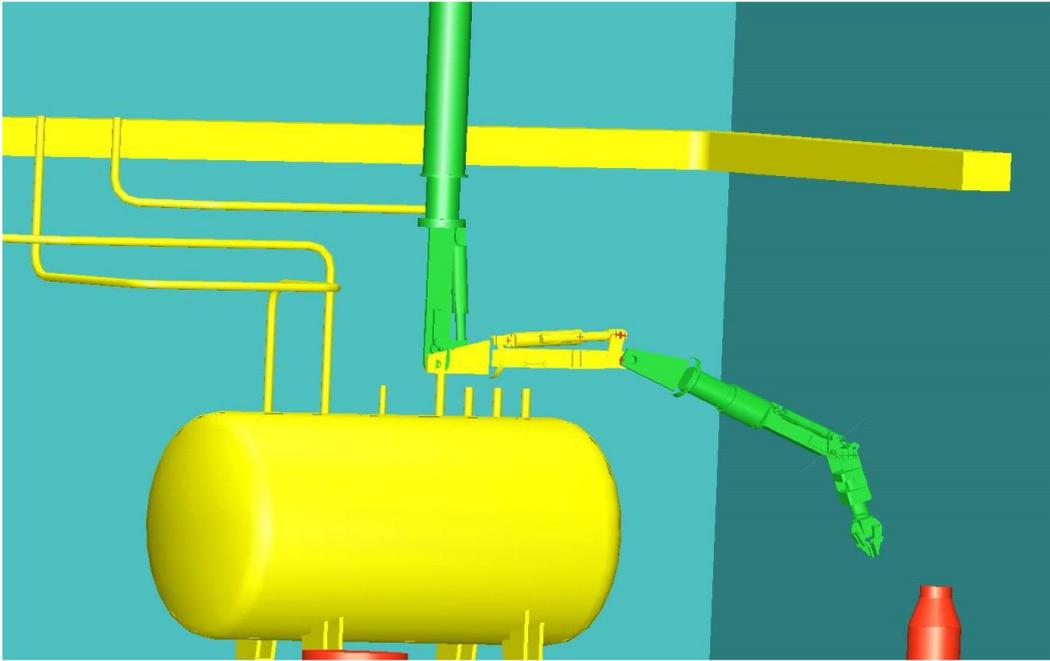
經驗回饋及優良典範的訊息需進一步共享；反應器技術，法律問題，可用人力和財政資源方面，可用的人力和財政資源的差異巨大；建議進行除役各式研討會，進行除役資訊交流，並取得研究型反應器相關技術與資訊。此方面 IAEA 提供除役 wiki 百科及 E-learning 電子化學習、同業評估，以 IAEA 之標準、技術指引及國際的優良典範進行 ARTEMIS(integrated review service for radioactive waste and spent fuel management, decommissioning and remediation programmes) 放射性廢物和用過燃料管理除役和修補計劃整合性審查服務。於 2017 今年，IAEA 將於英國 Sellafield 進行「除役先進技術的運用研討會 Workshop on application of state-of-the-art technologies for decommissioning [RER/9/138], Sellafield, UK, 2Q」，放射性廢物和用過燃料管理策略最佳化跨區域研討會。

(六)對未來的除役有重大影響的新興技術

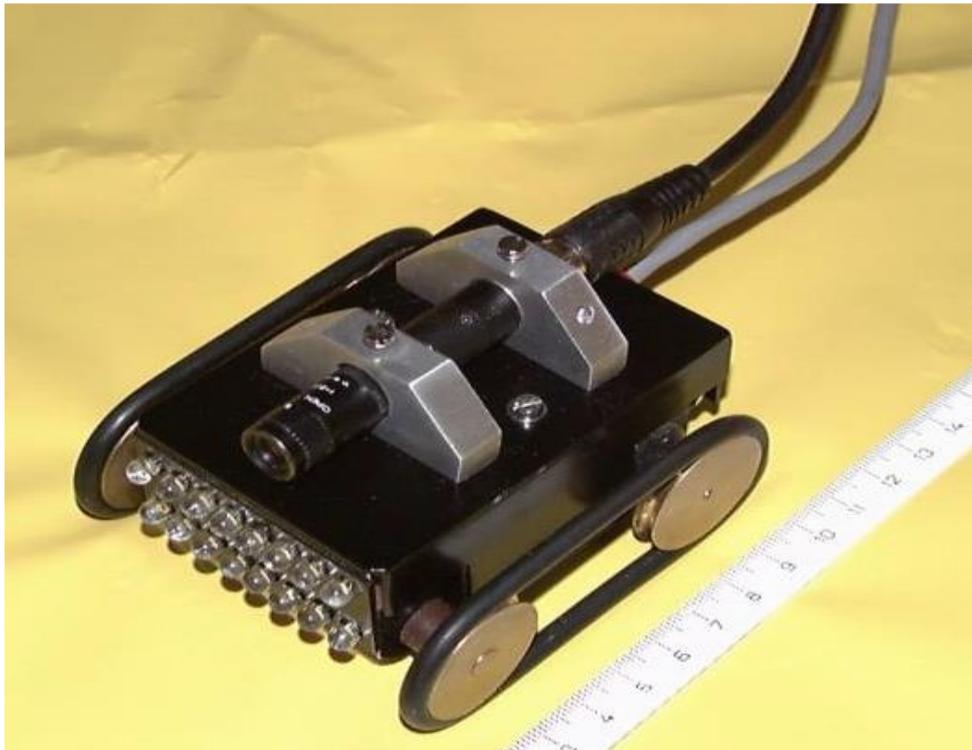
IAEA 報告 Evolution of R&D for nuclear decommissioning 中說明在 1990~2000 年代經過不斷的研發，目前已商業化之技術案例(Evolution of R&D for nuclear decommissioning , Michele LARAI A, IAEA)，如 Gamma 攝影技術、使用 3D CAD, VR, VISIPLAN 除役作業模擬，如圖五至圖七所示。



圖五、結合GPS自動收集表面污染讀數



圖六、斯洛伐克之 3D 建置和模擬技術



圖七、捷克開發使用管路檢查攝影機

使用先進的切割技術和除污工作，如日本普賢電廠使用電漿切割(但電漿切割時須留意 HEPA FILTER 阻塞造成作業人員汙染)、自動氣切機器、軌道式管路切割機器。其他持續發展之除役作業如下：

1. 視覺引導系統應用於切割操縱和除污；
2. 使用微波加熱技術淨化混凝土，已經研發多年的技術已獲得專利，但尚未商業化；
3. 建築物調查自動化；
4. 雷射導引技術；
5. 使用於機械人除污及 GPS 系統定位及數學演算法進行特性化工作；
6. 建置除役相關資料庫；
7. 以廢棄物為依據之除役策略；
8. 以強化實境(AR)技術進行工作管控；
9. 廢棄物管理追蹤；
10. 使用地理統計數據和其他抽樣方法；
11. 非破壞性特性調查；
12. 使用燒除技術進行塗層去除；
13. 以組合數學法進行廢棄物處置最佳化；
14. 即時 3D 伽馬射線顯影成像。
15. 開發模組化之設備，以便能夠在現場即時修理，減少工時。

(七)國際除役作業正常工作和事故情況之除役作業人員技術培訓

目前國際上，主要是除役作業常規性的培訓，並未對正常工作和事故情況下之進行特定訓練；其改進方式為先取得工作場所相關資料，以廢棄物管理分類、特性調查、及廢棄物等級準則之訓練為優先，其次是荷重吊掛及大型組件拆解，請有經驗之員工回來進行除役作業人員教導（例如日本普賢電廠延請退休人員回廠內當顧問）。

(八)先進資訊技術於除役工作的應用及管制單位溝通呈現

管制人員對除役工作對作業可能不熟悉，造成除役工作與管制單位的溝通不易，透過視覺化的技術(如 3D animation) 呈現給管制單位，能有效幫助管制人員理解，但以視覺化技術無法取代正式文件。先進資訊科技的應用仍須驗證其可靠性，須考慮資訊科技視覺化的呈現提供除役現場工作仍有所差異，仍會引起管制人員的質疑，故進行情境模擬，須夠保守，且須將保守性的假設呈現給管制人員瞭解，以解除服管制人員的質疑。

先進資訊技術於除役工作的應用，須考慮其約 10 年的生命週期，使管制單位的認同其使用的工業標準。

(九)電廠從運轉到除役過渡期必須注意的問題

1. 如何留住最佳的員工(必須盡速考慮的問題)。
2. 除役電廠的預算與財政可能無法支應夠多的員額，故若干員工可能被規劃離開電廠。
3. 被規劃離開員工的心態。
4. 保持員工的積極性和主動性，並注意可能長時間停留在停機狀態。
5. 從運轉中重複工作改變成除役中不同且變動性工作，心態上的改變。
6. 讓員工了解除役中不同的安全議題。
7. 除役後組織變動，運轉中「直線式的階層管理」變更為除役時「以專案為導向」之管理。
8. 廢棄物存放規劃及特性化、除污規劃等工作可於除役過渡期之前展開。
9. 運轉中之數據務必保留。
10. 與廠區附近之民眾保持良好的溝通管道。
11. 退休員工保持聯繫。

(十)從運轉到除役的過渡的最佳管理做法

1. 良好的內外部溝通規劃。
2. 建立良好的安全文化，重視輻射安全。
3. 建立除役民眾資訊中心。
4. 人力資源政策即時的對話。
5. 由於法規仍會改變，與管制單位建立密切聯繫。
6. 對所有專案有明確的組織結構。
7. 有明確的目標以協助員工對新方向建立新的心態。

(十一) AREVA 化學除污技術(2011~2016 年執行之計畫)應用實績

此次出國前核一廠除役專案小組希望獲得系統除污技術相關資訊，此次挪威研討會由 AREVA 公司全系統除污專家 Luis SEMPERE BELDA 報告 AREVA 公司化學除污技術(2011~2016 年執行之計畫)實績，由於報告時間僅 20 分鐘，未能得到充分資訊，之後於三月八日 AREVA 公司的 Christian Topf 曾來核一廠簡報，雙方針對此項議題進一步的交流研討。其 2011~2016 年執行之實績如下：

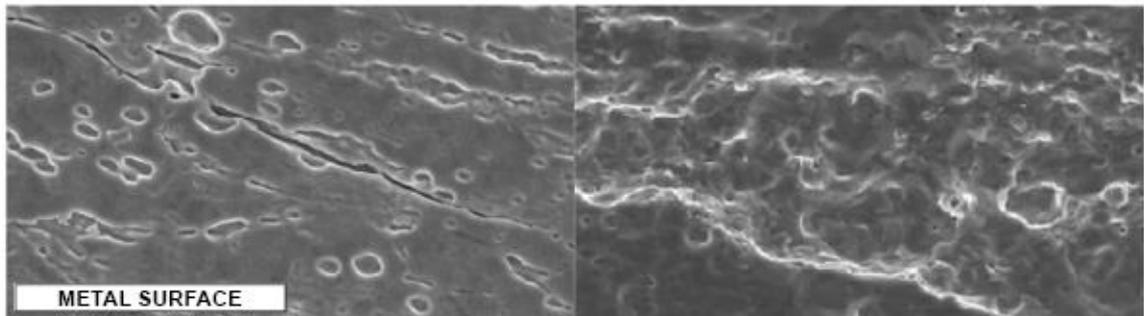
1. 法國 Chooz-A 電廠(4-LOOP PWR ,305MWe,其除役 D&D 策略為 COMPONENT- SAFSTOR) 除污計畫 :

- ✓ 一次側冷卻水系統除污
- ✓ 以組件除污處理
- ✓ 氧化物移除與基層金屬移出
- ✓ 經驗學習 : 化學流程控制、離子交換樹脂處理、除污設施與技術最佳化

(1) 由於 Chooz-A 電廠以 SAFSTOR 方式除役，RPV 部分維持原狀不進行除污，steam generator 及 pressurizer 納入除污；4 個 loop 中 loop-1 與 loop-2 成對，loop-3 與 loop-4 成對方式進行管路除污；以 AREVA 的 AMDA 自動模組化除污設備作為外部除污設施；氧化物移除以 AREVA 的 HP CORD UV(過錳酸-UV 化學氧化物抑低除污) 除污程序；基層金屬移出以 AREVA 的 CORD D(Chemical Oxidation Reduction Decontamination for Decommissioning)除污程序進行。

CORD : 化學氧化物抑低除污 Chemical Oxidation Reduction
Decontamination

AMDA : 自動模組化除污設備 Automated Modular Decontamination
Appliance



金屬表面缺陷造成活度
累積使除污更為複雜

以 CORD D 移除 6um 基層金屬

AMDA™



圖八、AREVA 自動模組化除污設備

於全系統除污期間使用自動模組化除污設備及放射性廢物減量技術(例如去污化學品的 UV 分解)，配合電廠使用自己的系統進行全系統除污。於除污期間，自動模組化除污設備(如圖八)連接到兩個不同的 RHR 系統，透過取樣進行精確的流程控制和除污溶液的機械過濾。自動模組化除污設備包括泵，加熱器，離子交換柱，過濾器，UV 反應器，取樣系統，監測系統，以自動遙控方式控制化學注入設備。

(2) 以非腐蝕性化學物質之 CORD D 控制型基層金屬(CORD D for controlled base metal removal) 除污

使用有機草酸(HOOC-COOH)做為除污化學溶液，較使用氫氟酸或其他無機酸溶液作為基層金屬除污更為安全。基層金屬去除之厚度達次微米精準度。依劑量率或活度動態控制其去除基層金屬之厚度；草酸於反應終止後分解為 CO₂，無需複雜又昂貴之廢棄物處理；CORD D 使用在於多缺陷之金屬表面除污；蒸汽產生器等大型組件將其氧化層與基層金屬移除，經除污處理後使 Chooz 廠址重新界定為法國 VLLW 超低放射廢棄儲存場(ANDRA)。

Steam generator's radiological characteristics

BEFORE	AFTER
40 000 Bq/cm ²	40 Bq/cm ² (CORD)
40 000 Bq/cm ²	2 000 Bq/cm ² (other treatment for plugged tubes)
700 μSv/h	1 μSv/h
450 GBq Co60	0.65 GBq Co60

steam generator 除污前後比較

2. 2012 德國南部 KKU 案例

德國 KKU 核能電廠(SIEMENS KWU PWR 4-LOOP, 1410MWe) 於 2012 年進行全系統除污，平均除污係數>90，total dose 為 75mSv. 周圍劑量率抑低達 1/100。

KKU 全系統除污前/後接觸劑量率：

KKU 2012	NUMBER OF MEASURING POINTS IN THE SYSTEM WITH DOSE RATE / (mSv/h)									
	<0,005	< 0,01	< 0,05	< 0,1	< 0,5	< 1	< 2	< 5	< 10	< 20
before FSD	0	0	0	0	30	22	5	5	17	4
after FSD	8	8	44	14	8	0	0	0	1	0

3. 2013 年德國南部 PWR GKN1 案例

德國南部 GKN1 核能電廠(SIEMENS KWUPWR 3-LOOP, 860MWe)於 2013 年進行全系統除污，平均除污係數>80，total dose 為 61mSv，並達成 20%離子交換樹脂廢料體積抑減。

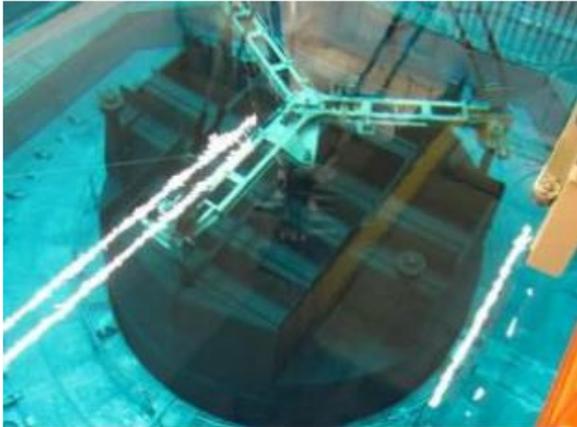
GKN1 全系統除污前/後接觸劑量率：

GKN1 2013	NUMBER OF MEASURING POINTS IN THE SYSTEM WITH DOSE RATE / (mSv/h)									
	<0,005	< 0,01	< 0,05	< 0,1	< 0,5	< 1	< 2	< 5	< 10	< 20
before FSD	0	0	4	4	25	20	7	5	1	0
after FSD	13	7	35	4	4	2	1	0	0	0

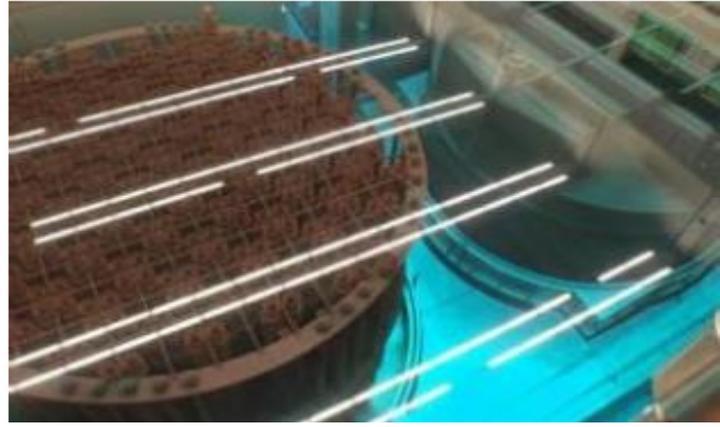
KKU 與 GKN1 電廠進行全系統除污，環境劑量率抑減約 100 倍。

4. 2015 年德國南部 BWR KKI1 案例

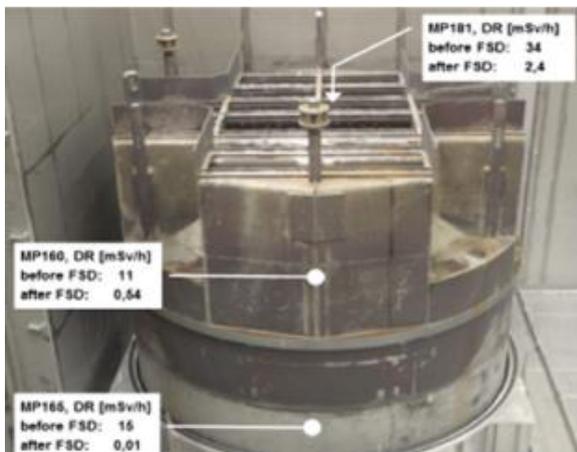
德國南部 KKI1 核能電廠(SIEMENS KWU BWR ,912MWe)於 2015 年進行全系統除污，德國第一個 BWR 電廠除役後進行全系統除污，主要為 RPV 蒸汽乾燥器及汽水分離器等不銹鋼與碳鋼等內部組件除污，使用除役前 CORD 進行除污以抑減廢料產生，其除污係數達 46，故蒸汽乾燥器的切割可免於水下進行作業。



2012 年全系統除污前蒸汽乾燥器水下存放



2012 年全系統除污前汽水分離器乾燥器水下存放



2015 年全系統除污後蒸汽乾燥器乾式存放



2015 年全系統除污後汽水分離器乾式存放

5. 2016 年德國北部 BWR KKK 案例

德國北部 KKK (SIEMENS KWU BWR ,1402MWe)為德國最大 BWR 核能電廠，於 2016 年進行全系統除污，主要為 RPV 內部組件不銹鋼與碳鋼等金屬除污，使用高容量樹脂進行除污以抑減廢料產生，相關除污後成果將於 2017 年 3 月發表。

✚ 考察瑞典 CYCLIFE 公司金屬廢棄物處理回收技術與設施

法國 EDF 公司於 2016 年間併購 Studsvik 公司位於瑞典和英國的兩處低放射性廢棄物處理設施，並更名為 CYCLIFE。EDF 旗下位於瑞典的 CYCLIFE 廢金屬熔煉回收設施自 1987 年即開始營運至今，已累積近 30 年的運轉經驗。早期由於設施功能以及經驗有限，生產能力較低。早在 1988 年，廢金屬熔煉回收設施接收到第一批來自國外委託處理的大型組件，內容包括低壓預熱器(low pressure pre-heater)和汽水分離器(moisture separator)組成，重達 300 公噸，使當時的 Studsvik 面臨挑戰。到了 1990 年代，由於設施擴充並持續累積實務經驗，處理來自 BWR 電廠如熱交換器和汽渦輪機殼等大型組件，對於 Studsvik 廢金屬熔煉回收設施而言，已屬常規業務。

當今 CYCLIFE 已進一步開發拓展成為已經國際性服務供應商，有能力接收處理來自核電廠的大型污染廢金屬組件，有些甚至是污染程度較高及/或複雜的幾何形狀，如 PWR 蒸汽發生器，BWR 再熱器和 Magnox 鍋爐。



圖九、CYCLIFE 廢金屬熔煉設施大型組件接收暫存區

多年來，CYCLIFE 的廢金屬熔煉回收設施已處理過許多從核電廠汰換下來的大型組件，包括 BWR 汽渦輪機，PWR 蒸汽發生器和 Magnox 鍋爐。CYCLIFE 廢金屬處理回收的理念是為了達到最終處置廢棄物減量，並將有

使用價值的金屬材料回收再利用。Studsvik 的廢金屬熔煉回收設施(即現今 CYCLIFE)處理瑞典於 2004 年至 2014 年間施行核能更新計畫所汰換下來的廢棄金屬組件，累計約達 9000 公噸。

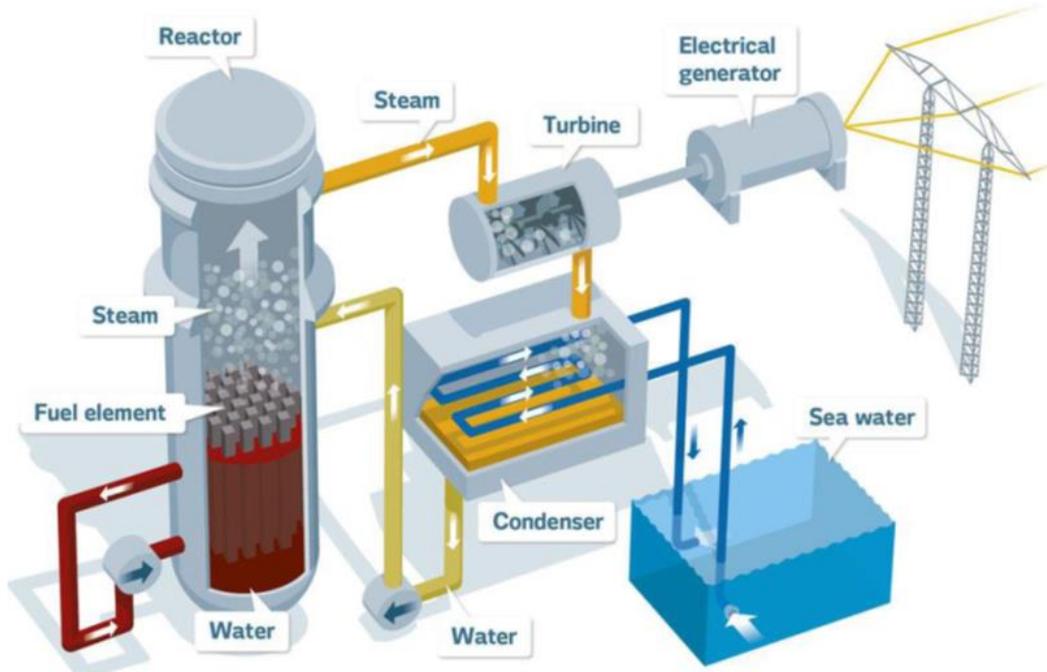


圖十、 瑞典 CYCLIFE 廢金屬熔煉設備現場作業

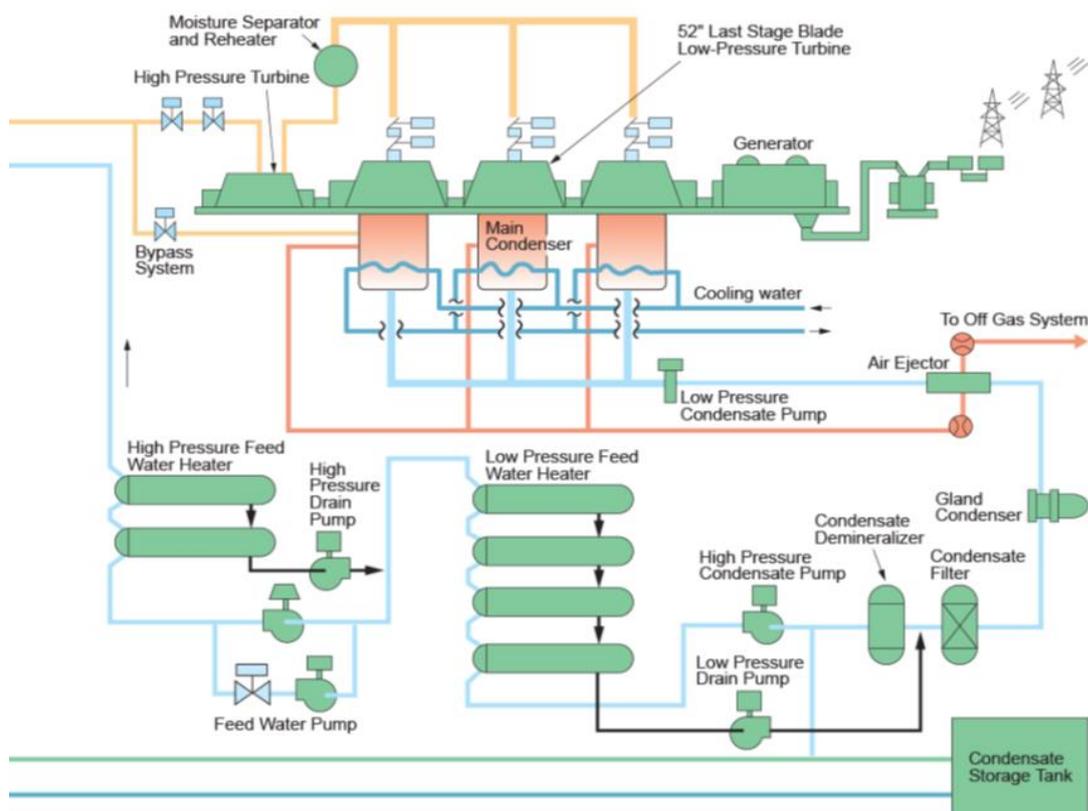
儘管 BWR 和 PWR 兩種類型的反應器之間很許多相似處，但在汰換組件的管理方式仍有差異，現分別說明如下。

BWRs

沸水式反應器由於其系統流程設計導致其系統組件可能被污染範圍較大因此除役後所產生大於外釋標準的廢金屬組件數量也較多，主要是來自汽機廠房的系統設備，包括氣機，熱交換器，閥，泵以及許多管路結構等。據 CYCLIFE 人員表示，在 BWR 沸水式電廠系統當中，屬於汽機廠房蒸汽和凝結水的系統組件，包括從高壓汽機開始，一直到高壓飼水加熱器之間的管路組件設備（如圖 所示），CYCLIFE 都有能力處理。



圖十一、沸水式反應器發電系統流程



圖十二、BWR 電廠蒸汽系統設備流程圖

CYCLIFE 曾接受業界委託處理的 BWR 系統組件包括有：

- ✚ 高壓汽機
- ✚ 低壓汽機
- ✚ 低壓飼水加熱器
- ✚ 壓飼水加熱器
- ✚ 蒸汽再加熱器（進入低壓汽機前進行蒸汽加熱的熱交換器）
- ✚ 冷凝器（蒸汽側）
- ✚ 蒸汽閥
- ✚ 泵

圖十三為瑞典 Forsmark 電廠委託 CVYCLIFE 處理之 3500 噸汽機轉子。

圖十四為瑞典 Oskarshamn 電廠委託 CYCLIFE 處理之 170 噸蒸汽再加熱器。

圖十五為德國 Wurgassen 電廠委託 CYCLIFE 處理之汽機組件。

圖十六為英國 Borkeley 電廠委託 CYCLIFE 處理之 Boiler 組件。



圖十三、瑞典 Forsmark 電廠委託處理 3500 噸汽機轉子



圖十四、瑞典 Oskarshamn 電廠委託處理 170 噸蒸汽再加熱器



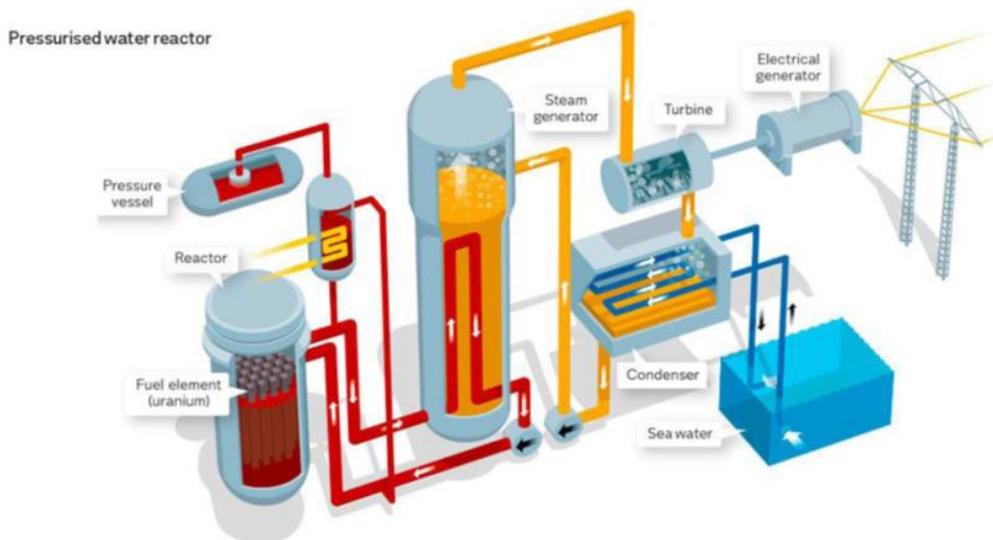
圖十五、德國 Wurgassen 電廠委託 CYCLIFE 處理汽機組件



圖十六、英國 Borkeley 電廠委託 CYCLIFE 處理之 Boiler 組件
(每件 310 噸，共有 5 件)

PWRs

壓水式反應器通常汽機系統組件是無污染的。可作為廢料處理的典型 PWR 組件主要包括蒸汽產生器和其他熱交換器，加壓器以及反應器廠房內的其他設備。



圖十七、壓水式反應器發電系統流程

蒸汽產生器的污染在管側，蒸汽側除非熱交換管有洩漏，通常是沒有污染的。蒸汽產生器在進行熔煉處理前須先將熱交換管先行抽離。

瑞典 Ringhals 電廠曾將機組更新而汰換下來的 9 座蒸汽產生器，每座 310 噸，委託 CYCLIFE 代為處理，如圖 所示。



圖十八、瑞典 Ringhals 電廠委託處理 9 座蒸汽產生器(每座 310 噸)

CYCLIFE 廢金屬熔煉回收設施之廢棄物接受標準

經由現場參訪以及與設施專業人員研討得知 CYCLIFE 熔融處理設施場可接收處理低放射性污染的金屬廢料，輕微活化的金屬廢料和核電廠的大型組件。在大多數情況下，只要符合“廢料接收標準”就可以接受。

(1) 金屬材質

Cyclife 廢金屬熔煉場可以處理的金屬種類包括

- ✚ 碳鋼
- ✚ 不銹鋼
- ✚ 鋁
- ✚ 銅

✚ 黃銅

✚ 鉛

其他幾種金屬，如鈦，則採用機械法除污後進行外釋，通常不會熔化。混合金屬，如電動馬達，或是具有複雜幾何形狀的廢組件則無法接收。

(2)輻射特性

廢組件表面劑量率一般應低於 0.2 mSv / h，即使有高達 0.5 mSv / h 的 hot spot，在大多數情況下，也是可以接受的。一米距離的劑量率應低於 0.1 mSv / h。β 和 γ 總活性應介於 50-100 Bq / g，α 活度應低於 100 Bq / g。

法國電力公司 EDF 擁有位於法國、瑞典和英國等三處低放射性廢棄物處理及減容設施(包括焚化爐及高溫裂解爐)，整體而言所能處理的廢棄物包括：

✚ 鋼、銅、黃銅、鋁、鉛等 廢金屬

✚ 蒸汽產生器、汽機、熱交換器，反應器容器，燃料運輸桶...等 大型組件

✚ 運轉廢料、維修廢料、木材、橡膠手套、鞋、紙板、交換樹脂...等 可燃固體廢料

✚ 洗滌水溶液，硼酸...等 可燃液體廢料

✚ 污染的油、溶劑、瀝青、電纜等雜項廢棄物

EDF 位在英國的處理設施接收的廢金屬經過除污程序後達成外釋，位在法國和瑞典的兩處設施均有金屬熔煉設備。瑞典廠區係接收污染較低之廢金屬組件，其處理回收後的金屬材料主要供應至核能以外的工業界，法國廠區可接收污染程度較高之廢金屬組件，其處理回收後的金屬材料則以供應核能業界為主。

EDF 位於瑞典和法國熔煉設施之廢金屬接收標準分別為：

瑞典廠區：50-100 Bq/g (β 及 γ 放射性強度)以達到外釋的回收目標
100 Bq/g (α 放射性強度)

法國廠區：20,000 Bq/g (β 及 γ 放射性強度)

370 Bq/g (α 放射性強度)

金屬廢料抵達 CYCLIFE 進行熔煉回收前必須先經過幾個前處理步驟，包括機械切割，噴砂除污和材料分類。操作過程中使用特別設計的切割和除污工具，以確保工作人員的輻射防護。經過切割與除污的金屬廢料在裝入熔爐之前，必須再度進行檢查，確認材料不含任何液體或封閉的空間。當金屬熔化後，加入 CYCLIFE 專利配方的分離劑，將含有放射性物質的熔渣 (Slag) 懸浮於熔漿表面並予以刮除 (約佔總體積 3-5%)，刮除後剩餘約 95-97% 體積的無污染金屬熔漿則被鑄成錠塊 (Ingot) 並留取具代表性樣品，以確保完整的可追溯性。

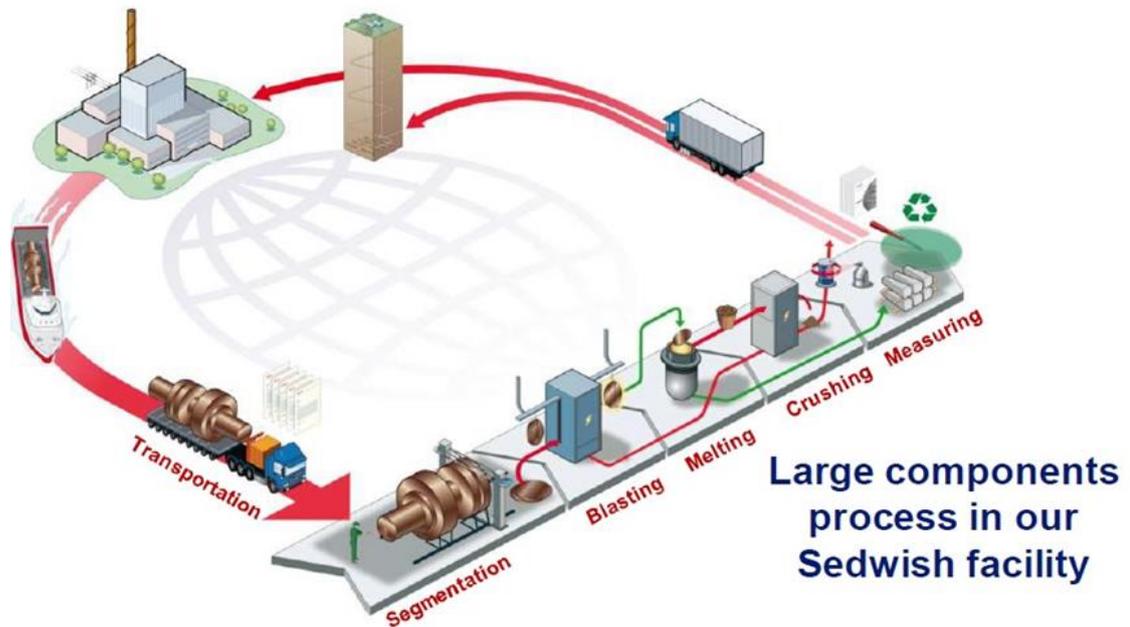
瑞典 CYCLIFE 對於大型廢金屬組件的處理流程，包括從核能電廠裝箱後利用海路搭配陸路的方式運抵處理廠，經過切割 (Segmentation)、噴砂除污 (Blasting)、熔煉 (Melting) 及壓縮定型 (Crushing) 等處理程序後，再經過偵測 (Measuring) 程序後分流處理。製成的錠塊則回收至自由市場，達到資源回收再利用的目的。處理過程所產生的二次廢棄物，包含刮除熔渣以及切割除污過程所產生的碎屑等 (約佔總體積 5-10%)，則必須歸還原委託處理的業者。瑞典 CYCLIFE 大型廢金屬組件整體處理流程如圖二十一所示。



圖十九、廢金屬組件經切割除污熔煉後產出的金屬錠塊



圖二十、熔煉錠塊同步取樣進行核種分析以保持可追溯性



圖二十一、瑞典 CYCLIFE 大型廢金屬組件整體處理流程

四、建議

1. 從本次研討會的交流過程發現，國際業界之間的除役資訊交流共享尚不是很通暢，例如除役公司的技術與經驗常因智財權因素而無法讓除役電廠充份了解，以及除役成本估算訊息的不足等等，皆造成除役工作推動的困難。經驗回饋及優良典範的訊息需進一步共享。建議持續參加及辦理各式除役研討會，進行除役資訊交流，兼取研究型反應器相關除役技術與資訊有，亦有助於掌握國際業界脈動，調整未來各項除役規劃準備的方向。
2. 依照目前核一除役計畫中有關除役廢棄物產量的估算，核一廠兩部機除役後預估將產生約 28379 公噸金屬廢棄物，其中包括初步研判無污染應可外釋，以及經過除污後預期可達到外釋標準的金屬廢棄物約 18223 公噸，其餘則為活化金屬約 1223 公噸以及汙染金屬 8933 公噸。若能考慮規劃將污染程度較低的金屬廢棄物，採用熔煉方式加以處理，除了可將有用物質回收再利用外，亦可節省可觀的廢棄物貯存空間，以及後續最終處置費用。目前核一除役計畫對於除役所產生金屬廢棄物的處理，係規劃以超高壓壓縮方式予以減容後裝桶貯存，建議未來可以朝下列幾個方向進一步評估規劃：
 - (1) 委外處理：參考 EDF 減容經驗，將汽機組件、熱交換器、汽水分離器等大型組件送往國外減容處理。其優勢為經過熔煉所產生約占原組件 90-95%重量比例的熔煉錠塊，可轉交由熔煉處理公司回收至自由市場，僅剩下大約 5-10%的廢棄物(熔渣)再運回。
 - (2) 將大型組件如熱交換器、汽水分離器等，除污至符合外釋標準後，委由國內鋼鐵廠進行熔煉/減容。其優點為可藉此扶植發展自主除役技術及產業，但潛在問題則為在當前社會反核氛圍與情勢下，是否能夠順利推動一定比活度以下極低微放射性廢棄物的外釋作業，尚待努力溝通以期待能有所突破；另外則是即便找到有意願配合的國內廠家，經過熔煉所產生的熔煉錠塊，未來的法規是否能夠允許在國內自由市場回收再使用，也是一項不確定因素。
3. 建議繼續蒐集國外大型組件減容經驗，並從法規管制的層面，持續了解管制單位對於將低放射性金屬廢棄物委託國外業者代為處理回收的看法和意見，以及相關法規要求。

4. 目前核後端處針對核一除役計畫，已仿效 WPDD 的運作模式成立低階放射性廢棄物最佳化管理之任務小組，進行深入研究探討。建議核一廠成立金屬廢棄物處理工作小組，嘗試針對目前運轉階段所產生並暫存於倉庫的大型金屬廢棄組件處理回收的可行性，進行研究與試驗，以解決未來電廠進入除役後的廢棄物倉儲問題。

五、附 錄

1. 研討會議程表

Workshop on "Current and Emerging Methods for Optimising Safety and Efficiency in Nuclear Decommissioning" 7–9 February 2017 Sarpsborg, Norway	
PROGRAMME	
Tuesday, 7 February 2017 Successful application of R&D in decommissioning and future needs	
Welcome and Opening Speeches Workshop Chair: Ákos HORVÁTH, Co-Chair: Jon KVALEM	
8:30	Welcome and Introduction to IFE Nils Morten HUSEBY, CEO IFE
8:45	Introduction to the OECD Halden Reactor Project Jon KVALEM, OECD HRP Deputy Project Manager
8:55	Welcome address by Workshop General Chair Ákos HORVÁTH, CER, Hungary
9:00	Introduction to the Workshop and Practicalities István SZŐKE, OECD HRP
Session 1: Workshop Introductory Presentations Session Chair: Con LYRAS, Co-Chair: Jon KVALEM	
9:05	Session opening
9:10	International Perspective on Decommissioning in OECD Nuclear Energy Agency Countries Inge WEBER, OECD NEA
9:35	IAEA Global support of decommissioning implementation with a focus on advanced technologies Vladimir MICHAL, IAEA
10:00	Decommissioning research within the OECD HRP and opportunities for application István SZŐKE, OECD HRP
10:25	Session closing
10:35	Coffee break

Tuesday 7th February

Session 2: Experience from starting, on-going and completed decommissioning projects	
Session Chair: Mika SHIMBA YAMADA, Co-Chair: Jan PORSMYR	
11:00	Session opening
11:05	Dismantling of the SVAFO research reactors R2 & R2-0 in Sweden Hans-Uwe ARNOLD, AREVA, Germany
11:25	Decommissioning and dismantling of nuclear research facilities in Switzerland: lessons learned Fritz LEIBUNDGUT, Paul Scherrer Institute, Switzerland
11:45	Challenges of decommissioning of heavy water research reactor Yidong ZHOU, CIAE, China
12:05	Lunch
13:00	FIR1 TRIGA research reactor decommissioning project Antti RÄTY, VTT, Finland
13:20	Implementing Waste Led Decommissioning in Practice - Experiences from a Research Facility Per LIDAR, Studsvik, Sweden
13:40	Chernobyl NPP decommissioning efforts. Past, Present and Future Viktor KUCHINSKIY, Chernobyl NPP, Ukraine
14:00	Lessons learned from ongoing decommissioning project of Fugen NPS Masashi TEZUKA, JAEA, Japan
14:20	Coffee break
14:40	Challenges of Ignalina NPP decommissioning – View of Lithuanian operator Pavel AKSIONOV, INPP, Lithuania
15:00	International good practice on practical implementation of characterisation in decommissioning Arne LARSSON, WPDD Task Group on Radiological Characterisation and Decommissioning
15:20	Progress in decommissioning the Low Flux Reactor in Petten Renate DE VOS, NRG, Netherlands
15:40	Comparative analysis of the countermeasures to mitigate exposure of the public to radioiodine following the Chernobyl and Fukushima accidents: Assessment of doses to the thyroid Sergey SHINKAREV, SRC-FMBC, Russian Federation
16:00	Session closing
16:10	Group discussions: Needs and opportunities for improving decommissioning practices
17:10	Adjourn
17:40	Games

Wednesday 8th February

Wednesday, 8 February 2017	
R&D and application of advanced technologies for decommissioning	
Session 3: New technologies for decommissioning Session Chair: Richard MCGRATH, Co-Chair: Espen NYSTAD	
8:30	Session opening
8:35	Evolution of R&D for nuclear decommissioning Michele LARAIA, Italy
8:55	Decontamination in preparation for dismantlement - AREVA's chemical decontamination technologies, projects performed and results obtained in the period 2011-2016 Christian TOPF, AREVA, Germany
9:15	New developments of autoradiography technique to improve alpha and beta measurements for decommissioning facilities Pascal FICHET, CEA, France
9:35	Waste characterisation in a Swedish uranium facility during decommissioning using nuclide vectors and nuclide specific measurements Patrik KONNEUS, Studsvik, Sweden
9:55	Improvement of a separation method for the reduction of secondary waste from the waterjet abrasive suspension cutting technique Martin BRANDAUER, Karlsruhe Institute of Technology, Germany
10:15	How characterization and clearance process is planned to be optimized by combining MARSSIM methods with parametric statistics in decommissioning of Karolinska University Hospital in Stockholm Jonatan JISELMARK, Studsvik Consulting AB, Sweden
10:35	Session closing
10:45	Coffee break

Wednesday 8th February

Session 4: Advanced information technologies for decommissioning	
Session Chair: Christine GEORGES, Co-Chair: Michael LOUKA	
11:00	Session opening
11:05	Surface contamination activity reconstruction based on measurements of ambient dose equivalent Konstantin CHIZHOV, SRC-FMBC, Russian Federation
11:25	Application of constraint satisfaction algorithms for conditioning and packing activated control rod assemblies in MOSAIK casks Philip J. HARDING, Brenk Systemplanung, Germany
11:45	Advanced Technologies for Fuel Debris Retrieval towards Fukushima Daiichi Decommissioning Eiichiro WATANABE, IAEA
12:05	Lunch
13:00	Comparison of standardised decommissioning costing tools on pilot Vienna TRIGA MARK-II research reactor Kristina KRISTOFOVA, KIND Consultancy, Slovak Republic
13:20	Experiences of development of IT support systems for decommissioning of Fugen NPS Yukihiro IGUCHI, JAEA, Japan
13:40	IAEA assessment tools for nuclear and radiological emergencies Joseph George CHAPUT, IAEA
14:00	Applying the HVRC VRdose planner in the design of a Pneumatic Transfer System Qasim KAPASI, NNL, UK
14:20	Historical fuel management at IFE and opportunities for application of advanced information technology Barbara C. OBERLÄNDER and István SZŐKE, IFE
14:40	Learning decommissioning through gaming Espen NYSTAD, OECD HRP
14:50	Session closing
15:00	Demo session with coffee break: Advanced information technology developed at IFE for supporting decommissioning
16:00	Group discussions: Needs and opportunities for OECD-HRP and international research into advanced technologies for decommissioning
17:00	Adjourn
18:30	Workshop dinner

Thursday 9th February

Thursday, 9 February 2017 Improving decommissioning management on project, national and international level	
Session 5: Challenges and methods for improving decommissioning Session Chair: Michele LARAIA, Co-Chair: Grete RINDAHL	
8:30	Session opening
8:35	EPRI Research and Development projects for NPP decommissioning Richard MCGRATH, EPRI, USA
8:55	Needs for R&D and innovations to address challenges of nuclear facility decommissioning after its normal shutdown versus advanced approaches required for Fukushima Daiichi NPS decommissioning Gérard LAURENT, IN Solutions, France
9:15	New requirements to collect operational data that are essential for facility decommissioning Kristina KRISTOFOVA, KIND Consultancy, Slovak Republic
9:35	Federal guidelines for estimating external exposure of radiation workers in Russia Konstantin CHIZHOV, SRC-FMBC, Russian Federation
9:55	Coffee break
10:15	Long history of ³⁶Cl assessment of graphite waste by EDF engineering and the latest suggested developments Bernard PONCET, EDF-DP2D, France
10:35	Innovative approaches to the management of irradiated nuclear graphite wastes: Addressing the challenges through international collaboration with project 'GRAPA' Anthony J. WICKHAM, University of Manchester, UK
10:55	Strategic aspects on waste management in decommissioning of nuclear facilities Thom RANNEMALM, OKG, Sweden
11:15	Human and organisational factors in decommissioning IFE, Norway
11:35	Session closing
11:45	Lunch
12:45	Group discussions: Needs and opportunities for OECD-HRP and international research for advancing management of decommissioning
13:45	Coffee break

Thursday 9th February

Session 6: Workshop closing		
Session Chairs: Ákos HORVÁTH, Vladimír MICHAL, Inge WEBER		
14:00	Summing-up and closure of the workshop (all chairs)	
14:30	Group discussion (HRP members only): Moderators: Ákos HORVÁTH, Jon KVALEM OECD-HRP research directions	Site Tour: Halden reactor and facilities
16:30	End of discussions	
~18:00		Back from site tour