

行政院原子能委員會放射性物料管理局
委託研究計畫研究報告

核設施拆除方式及技術發展之
國際資訊研究

計畫編號：102FCMA004

報告編號：102FCMA004-10

執行單位：核能研究所

計畫主持人：周鼎

子項工作負責人：張淑君

報告作者：黃志中、任天熹、楊慶威

報告日期：中華民國 102 年 12 月

[本頁空白]

The Research of International Information of Nuclear Facilities Dismantling Methods and Techniques Development

Jhih-Jhong Huang, Tain-Shi Zen, Ching-Wei Yang

Abstract

The general scope of dismantling work includes components and structure decontamination / removal, waste packaging, packaging materials transportation, and a regulated disposal facility for disposal. Therefore, the choice of dismantling methods and techniques is also affected by the above-mentioned operations. Not only the techniques but also the impact of the operations-related laws and regulations, as well as public participation must take into consideration.

This report compiled from the management of large components from decommissioning to storage and disposal, dismantling techniques, RPV and its internal components cutting, large tanks removal experience. By this report, the methods and the techniques of dismantling nuclear power plant could be understood more comprehensive.

Keyword: Decommission, Dismantling Methods, Dismantling Techniques

Institute of Nuclear Energy Research

核設施拆除方式及技術發展之國際資訊研究

黃志中、任天熹、楊慶威

摘 要

廣義的拆除作業其範圍包括：組件和結構的去污/移除、廢棄物包裝、包裝物運送，及在受管制的處置設施中進行處置。因此拆除方式及技術的選用，不僅需考慮上述各項作業技術本身的影響，各項作業相關的法規、公眾的參與等皆需納入考量。

本篇研究報告彙整大型組件從除役到貯存和處置的管理、拆除技術、電廠 RPV 及其內部組件切割、大型桶槽拆除經驗，能更全面地瞭解核設施拆除方式及技術。

關鍵字：除役、拆除方式、拆除技術

核能研究所

目 錄

1 前言.....	1
2 大型組件從除役到貯存和處置的管理.....	3
2.1 簡介.....	3
2.2 最近各國在大型組件的管理經驗.....	4
2.3 在管理大型組件技術過程的主要相關行為者.....	16
2.4 相關問題概觀.....	19
2.5 作業的相互依賴性和整體最佳化.....	50
2.6 運轉者和監管機關及社會公眾之間的對話.....	56
3 拆除技術.....	62
3.1 簡介.....	62
3.2 金屬的熱切割技術.....	63
3.3 金屬的機械式切割方法.....	82
3.4 混凝土結構拆除.....	97
3.5 執行拆除技術之經驗回饋.....	109
3.6 機械手拆除技術.....	109
4 反應器內部組件切割經驗.....	115
4.1 簡介.....	115

4.2 反應器內部組件切割經驗	121
4.3 切割技術彙整	188
4.4 爐內組件切割的替代方案-完整處置	191
5 Rancho Seco 電廠反應器爐體切割經驗	194
5.1 簡介	194
5.2 經驗及作法	195
6 大型桶槽拆除	212
6.1 簡介	212
6.2 Trojan 電廠經驗：	212
6.3 Rancho Seco 電廠經驗	217
7 結論與建議	221
7.1 大型組件拆除方式	221
7.2 拆除技術	222
7.3 反應器內部組件切割	224
7.4 大型桶槽拆除	227
參考文獻	229

附 圖 目 錄

圖 3-1 氧乙炔切割.....	65
圖 3-2 氧-燃料切割的噴嘴（左）空氣（右）水下.....	66
圖 3-3 氧氣噴槍切割.....	67
圖 3-4 電漿火炬(plasma torch).....	69
圖 3-5 電漿火炬切割鋼板.....	69
圖 3-6 氧弧切割設備安裝示意圖.....	71
圖 3-7 MIG/ MAG 銲接示意圖.....	72
圖 3-8 放電加工去除材料示意圖.....	73
圖 3-9 接觸電弧金屬切削（CAMC）工作示意圖.....	74
圖 3-10 接觸電弧金屬切削（CAMC）切割鋼管.....	75
圖 3-11 接觸電弧金屬切削（CAMG）工作示意圖.....	76
圖 3-12 接觸電弧金屬鑽床（CAMD）.....	77
圖 3-13 雷射切割頭工作示意圖.....	81
圖 3-14 油壓撐開器破壞石墨.....	83
圖 3-15 （左）油壓剪（右）油壓撐開器.....	84
圖 3-16 (1)鋼絲鋸;(2)弓鋸;(3)帶鋸;(4)圓盤鋸;(5)鑽石索鋸.....	86
圖 3-17 切割用砂輪機.....	87

圖 3-18 爆炸切割鋼管	88
圖 3-19 軌道切割機切斷鋼管	89
圖 3-20 軌道切割機用於輻射區切斷鋼管	90
圖 3-21 (左)磨料注入水刀；(右)磨料懸浮水刀	92
圖 3-22 磨料水刀與磨料懸浮水刀的特性	94
圖 3-23 Bristar 化合物與裂石範例.....	100
圖 3-24 鑽石索鋸設備架設與鑽石索	101
圖 3-25 遙控的反鏟式衝擊錘	107
圖 3-26 機械手攜帶電漿火炬切割鋼板	112
圖 3-27 機械手攜帶圓盤鋸切割鋼板	113
圖 3-28 用於除役之桅杆式機械手	113
圖 3-29 雙臂式機械手.....	114
圖 4-1 典型的 PWR 反應器壓力槽.....	118
圖 4-2 典型的爐心擋板組件(Core Baffle Assembly).....	118
圖 4-3 Connecticut Yankee 爐心擋板組件	119
圖 4-4 較低的內部組件座落限制結構上	130
圖 4-5 CY 水下過濾系統.....	138
圖 4-6 Grant Machine 組裝結構	141

圖 4-7 Grant Machine 清理爐穴	142
圖 4-8 反應器壓力槽處置時的內部結構	142
圖 4-9 GTCC 切片之運送及包裝(Yankee 切割概述)	146
圖 4-10 協助內部組件舉升及定位的吊舉設備	148
圖 4-11 主要限制結構的下檔板.....	149
圖 4-12 固體廢料收集系統(SWCS).....	150
圖 4-13 固體廢料收集系統安裝於爐穴的部分	151
圖 4-14 典型磨料水刀切割系統	163
圖 4-15 工作控制中心.....	166
圖 4-16 機械手駕駛台.....	166
圖 4-17 SONGS 1 水質淨化系統	168
圖 4-18 淨化過濾器.....	169
圖 4-19 A-43 高完整性容器(High Integrity Container, HIC)	172
圖 4-20 往復式工具機(RMT)概念圖	179
圖 4-21 環形液壓操作切割設備(CHORCE)概念圖	179
圖 4-22 螺栓銑削刀具(BMT)概念圖	180
圖 4-23 往復式工具機實物模型測試	181
圖 4-24 冰鋸概念圖.....	187

圖 5-1 RPV 爐體.....	198
圖 5-2 RPV 爐體切割設備示意圖.....	203
圖 5-3 上法蘭切割.....	205
圖 5-4 爐體腰帶部位切割	205
圖 5-5 RPV 爐體切割結果示意.....	205
圖 5-6 RPV 爐體其他部位切割件廢棄物包裝與運輸	209
圖 6-1 由上往下切割，採用火炬切割	215
圖 6-2 一次側爐水儲存槽拆除作業	216
圖 6-3 燃料裝填水儲存槽拆除作業	217
圖 6-4 管路圓周切割機.....	219
圖 6-5 桶槽縱切鋸.....	219

附表目錄

表 2-1 大型組件不同運輸方法的優點與缺點	37
表 2-2 評估矩陣考慮不同階段/過程的主要議題	52
表 2-3 可能出現情境的評估框格	55
表 3-1 氧-燃料切割的相關性能參數	65
表 3-2 氧氣噴槍切割的相關性能參數	67
表 3-3 電漿切割的相關性能參數	68
表 3-4 氧弧切割的相關性能參數	70
表 3-5 電弧水刀切割的相關性能參數	72
表 3-6 接觸電弧金屬切割的相關性能參數	74
表 3-7 接觸電弧金屬研磨的相關性能參數	76
表 3-8 接觸電弧金屬鑽床的相關性能參數	77
表 3-9 雷射切割的相關性能參數	81
表 3-10 水刀技術的優點	94
表 3-11 VAK KAHL 的切削參數	96
表 4-1 反應器內件組件切割經驗	120
表 4-2 反應器組件特性彙整	158

表 4-3 AWJ 廢料顆粒特性.....	167
表 4-4 Songs Unit 1 反應器內部切割專案的主要成就.....	171
表 4-5 Songs Unit 1 水質淨化系統廢料量.....	173
表 4-6 熱屏蔽模型實施冷測試之切割比較.....	186
表 4-7 切割技術彙整.....	189
表 4-8 各個電廠切割專案統計比較.....	190
表 5-1 Rancho Seco 電廠基本資料.....	195
表 5-2 RPV 爐體(SA-533)輻射特性調查結果.....	199
表 5-3 RPV 爐體不銹鋼 Cladding 輻射特性調查結果.....	199
表 5-4 磨料水刀(AWJ)技術評估.....	201
表 5-5 爐體切割件物理數據.....	206
表 5-6 爐體腰帶部位切割件廢棄物包裝與運輸.....	207
表 5-7 RPV 爐體切割重要里程碑.....	210

1 前言

原子能委員會於民國九十二年八月頒布「核子反應器設施管制法施行細則」，並於民國九十三年七月發布「核子反應器設施除役許可申請審核辦法」，明定核子反應器設施除役申請應檢具之申請資料及除役計畫應包括之事項。我國完整的核能電廠除役審查技術，包括除役計畫書導則，除役計畫審查規範，以及除役相關程序中各項技術，如拆除技術、除污技術、廢棄物管理、輻射劑量評估等的審查能力，則有待進一步建立。本計畫之目的為深入研究除役中各項相關專業技術，使我國核子反應器除役計畫得以落實，且經由縝密之規劃，確保我國核設施除役工作進行之安全及順利。

102 年「精進放射性物料安全管制技術發展」計畫，分項計畫「用過核子燃料及放射性物料安全管制技術發展」，子項計畫「核子反應器設施除役技術研究」其中之一的項目「拆除方式及技術發展之國際資訊研究」，主要工作為蒐集各國核子反應器目前已除役或正在除役所採用一般金屬、一般混凝土、反應器壓力容器(RPV)及生物屏蔽拆除方式及技術，考量輻防安全及工業安全，配合除污程序、廢棄物管理、及減廢需求，以建立最適化拆除程序為訴求，建立拆除技術審查能力。

本篇報告為蒐集 Dismantling Techniques, Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice, Experience and Know-how, Final Report, June 2009、Decommissioning Technology Experience Reports, EPRI, Palo Alto, CA:2000, 1000884、Rancho Seco Reactor Vessel Segmentation Experience Report, EPRI 1015501, 2008.、Decommissioning: Reactor Pressure Vessel Internals Segmentation, EPRI 1003029, 2001.、. Reactor Internals

Segmentation Experience Report: Detailed Experiences 1993—2006, EPRI 1015122, 2007. 、 The Management of Large Components from Decommissioning to Storage and Disposal, OECD NEA/RWM/R September 2012 等電廠除役拆除技術、經驗相關研究報告，經研讀後彙整成此報告。

廣義的拆除作業其範圍包括：組件和結構的去污/移除、廢棄物包裝、包裝物運送，及在受管制的處置設施中進行處置。因此拆除方式及技術的選用，不僅需考慮上述各項作業技術本身的影響，各項作業相關的法規、公眾的參與等皆需納入考量，本報告彙整大型組件從除役到貯存和處置的管理、拆除技術、電廠 RPV 及其內部組件切割、大型桶槽拆除經驗，能更全面地瞭解核設施拆除方式及技術。

2 大型組件從除役到貯存和處置的管理

2.1 簡介

本章節主要是參考「The Management of Large Components from Decommissioning to Storage and Disposal」，這份報告主要是敘述核設施大型組件從除役到貯存和處置的管理，其中涉及拆除方式（切割、大塊切割或單一組件處置）的選擇之相關研究。

在核設施除役作業或在運轉中核設施的維護作業時，拆除組件可以切割（例如，減少尺寸），以便把切割件放置在標準的容器中，或當作單一個或多個大型組件處理或運送至處置設施。在大多數國家，已採用上述兩個選項，並有成熟的核子規劃經驗。導致如此決定的考慮因素和標準是多方面的，既包括法律和監管方面，尤其是處理、運輸、處置和廢棄物接收標準（WAC），以及運輸容器和劑量限制的可用性和可接受性。

最終管理的取捨可能不僅依除役的實體來選擇。在任何情況下，會產生放射性廢棄物而需要透過一系列的作業的處理，包括拆除、固化、萃取、短期或長期貯存、運輸條件、運輸目的地的廢棄物管理設施可能是貯存設施、處理設施或處置設施。

不同的參與者扮演重要的角色，在整個過程中選擇最相關的管理選項，因為單一組件的選項未必是最適合拆除過程中的每一個階段。例如，如果拆除大型組件引發了非常複雜的運輸問題，可能是優先選擇切割組件成為更小的切割件，在某些情況下，大型組件的處置也可能會產生貯存庫無法接受或低於貯存庫最佳的能力。基於如此的原因，整個規劃需要整合。建議大型組件的管理選項應在核電廠的除役計劃中加以描述，並應解

釋為什麼選擇一個特定的選項。在選擇建議選項，除役組織需要考慮到各別的需求，不僅是廢棄物運輸和貯存庫運作，也與安全及交通運輸主管部門相關。

此研究報告的目的為：

- 提供不同參與各方一個基礎，由各方的觀點，在最相關的管理選項達成交集
- 確定應評估哪些標準，才能瞭解這種關聯性。
- 促成溝通工具，由不同國家處理此一問題，從其經驗中獲得的效益。

目的為提供了一個工具，用於評估機構（例如，監管機關）和利益關係者（公眾），以及所有有關各方之間的對話，提供了一個工具，才能瞭解到給定的管理選項的優點和缺點。

因此，此技術導則所提倡整合的方法，包括所有參與者（如：除役者、監管機關、公眾、廢棄物管理機構、運輸業者、廢棄物所有者等）的利益。它的目的是幫助審查利害關係的問題，透過逐步的方式，說明所有的中間步驟，如處理和檢整、交通運輸及相關決策參數，以決定根據給定的情況下潛在的管理路徑的整體相關性的。

2.2 最近各國在大型組件的管理經驗

2.2.1 整體概述

在不同的國家“大型組件”的含義可能有極大的不同，無論是體積還是重量方面。例如，在瑞典，此名詞用於無法由 20 英尺的容器來運送或重量超過 20 噸。為了提供一個共同的定義，適用於所有國家，任何大型組件在此將認定為核設施的任何部分不經切割而拆除，由裝進非

標準的包裝容器來處置或貯存；由於它的重量，體積或放射性污染的程度，由當地監管機關需要特別考量。這意味著，由運轉廠商管理運輸、貯存或處理過程的相關標準不作任何修改，無法適用於大型組件。

顯然，“非標準的包裝容器”的概念是相對的，只有的在單一國家的規模下是有效的，這取決於所涉及設施的許可架構，如果該許可架構的持續發展，它可能會隨時間而改變。一般來說，涉及的組件，像是蒸汽產生器、調壓器、反應器容器和反應器蓋板、或運輸鋼筒。

管理大型廢棄組件的方法會引起廣泛的興趣，尤其是核設施運轉廠商、除役組織、廢棄物運輸和廢棄物管理機構，以及安全監管部門和其他國家機關。各國已成功進行管理和處置大型組件，並積累經驗，提供最佳化這些決定的基礎。

2.2.2 各國最近的經驗

本章針對各國特定的大型組件，提供近期各國的管理經驗簡介。

西班牙

在西班牙，大型組件管理的最佳化準則包括安全、技術、廢棄物管理、社會政治、監管和經濟問題。整體而言，最佳化必須處理之後的廢棄物管理運作，不同拆除選項（例如，拆除組件、可以是完整的組件或大塊拆解）的影響。特別重要的像是需要開發新的廢棄物容器（以及處理場所對其接受度）、組件拆除移出路徑、預期的去污作業的範圍（在廠址內或廠址外）、運送數量和類型等各方面。

西班牙放射性廢棄物局（ENRESA – Empresa Nacional de Residuos Radioactivos）目前所追求的是除役和廢棄物管理最佳化整合的方法，因此涉及與利害相關各方的溝通。最終，監管部門核准選定的管理選項

是必要的，作為任何特定的核設施的整體除役計劃的審查過程的一部分。大型組件的管理研究已經在 José Cabrera Nuclear Power Plant (NPP) 核電廠實行，並在未來將在其他核電廠除役時實行。

比利時

比利時管理大型組件的策略，以 10 MWe BR3 壓水式反應器(PWR) 在原廠址上切割作業的除役為基礎。在原場址上切割的程度取決於每一個大型組件選擇的運輸路程可接受標準。

對於活化的組件（例如，熱屏蔽層、壓力容器、內部組件），大量使用遙控水下切割、機械鋸（例如，帶鋸和圓鋸）與作為支援或直接用於特殊任務的熱切割技術（如電漿火炬、放電機械加工 [EDM]）。活化的組件必須當作放射性廢棄物處置。國家放射性廢棄物及濃縮易裂材料管理局(ONDRAF/NIRAS – Organisme national des déchets radioactifs et des matières fissiles enrichies)接受的標準包件為 200-L 或 400-L 的圓桶。如此的選擇，需要切割組件至每片的最大長度為~500 mm，最大重量為 560 公斤。包裝後，活化組件限制於水泥砂漿中，可以保存在貯存場所。最後，水泥砂漿包裝件將置於外包裝中，然後送到地質處置設施。

大型污染組件，像是壓力調節器、蒸汽產生器首先使用內循環製程來除污(氧化鈾金屬除污 Metal Decontamination by Oxidation with Cerium – MEDOC)，然後採用高壓水刀和鑽石索鋸切割成大塊。使用鑽石索鋸切割蒸汽產生器管束。經過除污、組件切割，以證明其遵守解除管制標準。

瑞典

在瑞典，Barsebäck Kraft AB (BKAB) 審查 Barsebäck 兩個關閉的反應器 (615-MWe BWR) 以反應器的壓力容器作為單一大型組件拆除的選項，並已提出結論給瑞典核能燃料和廢棄物管理公司 (SKB)。該選項包括一個平行的研究：SKB 研究擴充 SFR 的低階、中階放射性廢棄物貯存庫，以容納除役廢棄物，包括處置大型組件和中期貯存長半衰期的運轉和除役廢棄物。SKB 也在進行淺層處置極低階廢棄物 (VLLW) 和長半衰期組件的中期地表貯存的可行性研究。所有長半衰期的廢棄物最終處置地下處置庫計劃在 2045 年放置組件。

BKAB 考慮的問題是壓力容器其內部組件是取出還是保留的影響，因此在運輸過程中需要額外的屏蔽和特殊措施以固定內部組件。不同選擇的輻射和非輻射的風險是重要的考慮因素。很顯然，在拆除一個單一大型組件的壓力容器和其內部組件，在未來長期性廢棄物地質處置庫處置前 (目前計劃在 2045 年開始營運)，需先有一段中期貯存的。預期此選項是非常昂貴的，更有可能的是，由於地質處置可能相對高的成本，SFR 將採納基於放置壓力容器的這種方法 (除去其內部組件)。

至於運輸，大多數反應器壓力容器 (RPV) 需要反應器壓力容器可直接上下船，最大的 Oskarshamn 3 及 Forsmark 3，則需要通過駁船運輸。在這兩種情況下，將需要新的交通法規用於壓力容器及其內部組件的運輸。假設沒有活化的內部組件，有可能按照國際原子能機構 (IAEA) 現行規定運輸 RPV，但需依據特殊的安排。

大型組件運送已在瑞典成功進行 (例如，壓水式蒸汽產生器和沸水式蒸汽渦輪機，從 NPP 廠址至 Studsvik 除污、減量和外釋作為無限制使用的材料)。

德國

在德國，一個新興的除役做法為完整地拆除（不切割）大型組件並運送到臨時貯存設施。之後，組件被放置在貯存設施並允許放射性衰變，通常等到不需使用遙控技術就可進行切割，因此提供了材料清除和重複使用更大的可能性，而不是送去處置。需要臨時貯存設施是一個重要因素，需要很大的投資成本，因為這些設施可能要在相當長的一段時間內保持運轉。在關於貯存適當的時期後的任何後續切割，必須確保任何可能產生的放射性廢棄物將送到貯存場。目前設想的 RPV 處置的臨時貯存設施位於 Lubmin（德國）（ZLN）將切割後存放更長時間，然後放置於標準的廢棄物容器內，存放在 Konrad 貯存場，因為它不是專為設計給大型零部件的處置。

以下為德國大型組件拆除的一些案例：

在 2007 年 10 月，未切割的 RPV 從 Rheinberg 的核電廠運送到 Lubmin（德國）（ZLN）臨時貯存設施在。此外，2007 年 11 月（1 號和 2 號機組）2009 年 9 月（3 號和 4 號機組），Greifswald 核電廠完整的 RPV 運送到附近的 ZLN。ZLN 是一個大型的儲設施存（測量為長 240m、寬 140m、建築高度 18m）用於貯存用過核燃料和放射性物料（無論是已處理或大型組件的形式），及作為處理放射性物質（例如，切割技術）基礎設施。除去大型組件的另一個例子為位於 Jülich（Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor - AVR）高溫反應爐。從輻射防護的角度來看，在今天的安裝位置拆除反應爐桶槽，將可能需花費不合理的努力。因此，為了固定污染和內部結構的穩定，在 2008 年 11 月 AVR 反應槽填充了輕質混凝土。計劃由反應爐廠房吊運出完整的反應槽（重約 2000 Ton，高約 26m），並貯存在附近的一個臨時貯存設施。讓貯存的組件衰減約 30 至 60 年，此計劃是為了延長貯存設施和裝備所需技術

的基礎設施來切割反應槽成碎片，以滿足監管處置場廢棄物接收要求。該設施的運營商已經證明，藉由示範的原型概念，之後切割安全和輻射防護方面的技術選擇。

在 2007 年和 2008 年，德國授權涉及透過公路和鐵路以及海運和國內水道的幾個大型組件運送。在一般情況下，需要兩個同意書：基於危險品法規的一個特殊協議（聯邦輻射防護局所負責（Bundesamt für Strahlenschutz - BfS），及輻射防護法規的許可證（這是各州當局或聯邦鐵路管理局（Eisenbahn Bundesamt - EBA）所負責）。

美國

美國核管理委會（USNRC）定義了“大型組件”包括反應器壓力容器及爐頂、蒸汽產生器、壓力調節器、飼水加熱器、汽輪機轉子。在一般情況下，在國內處置一個單件的 RPV 是首選的管理解決方案，並有一些壓力容器已經安置在最終處置設施。在最近的兩個除役計畫，Shippingport 和 Trojan，內部組件保留在壓力容器內，由輕質混凝土所包圍。這種方法的基礎為人為的潛在入侵的風險小，整體廢棄物包件可能避免被列為 GTCC。應注意，被穩定在混凝土內之前，內部組件需進行除污。

重要的監管問題是廢棄物分類及運輸：在確定適當的廢棄物分類，除了在故意稀釋的情況下，USNRC 不允許體積平均。由於路程很長，通常存在風險及不同的地方交通運輸主管部門複雜的參與，以獲得移動的同意，Trojan 的 RPV 藉由鐵路和駁船移動，因此涉及哥倫比亞河大約 300 英里（500 公里）的旅程。

由美國能源部（USDOE）負責拆除大型組件的一個例子是位於美國能源部的 Savannah River Site（SRS），Aiken, South Carolina 重水組件

試驗反應器（HWCTR）的除役。為了確定除役過程是最佳的，正在研究四個除役可採用的方案。這些替代方案包括拆除、局部的和臨時的安全貯存、保留以利於重新使用及長期封存。進行評估環境、風險、效益、便於實施和成本的潛在影響後，選擇直接拆除。直接拆除也是最相容未來場址財產重新使用計劃的選項，因為將場址恢復到其原始狀態。

HWCTR 是一個拆除大型組件很好的範例。為了除去反應器中的 87 噸的圓頂，三個提升吊耳，附加在其表面上，焊接火炬切割其上半部。使用 200 英尺起重懸臂的 660 噸起重機，吊運巨大的圓頂離開其底座。圓頂被安置在地面，被切成小塊，並在核准的掩埋設施中處置。拆除圓頂可便利拆除兩個 21 噸的蒸汽產生器和一次吊運一個之前已拆除燃料的 110 噸的反應器壓力容器。拆除發電機和反應器之前，進行管道切割和運輸準備不減少其大小。一旦這些組件水平地放置，他們也安全地埋在 SRS 現場的掩埋設施。場址內處置設施的可利用性和具有說服力的證明，透過遷移地下水分析顯示，不需減少大小，現場處置符合監管所採用的防護廢棄物接收標準。此外，清空 HWCTR 蒸汽產生器 RPV 設施，拆除周圍 29 英尺圓柱形基地，地下部分的建築灌漿長期封存。

在美國能源部的設施中拆除大型組件的另一個例子是坐落於美國能源部的愛達荷國家實驗室（DOE's Idaho National Laboratory, INL），Idaho Fall, Idaho（見附件圖 6a）工程試驗堆（ETR）的除役。一旦建築結構被拆除，已移除燃料的 82 噸 RPV 當作單獨的組件吊運，作為一個組件在 INL 場址內的處置設施處置。與 SRS 的 HWCTR 一樣，清空 RPV 後 ETR 設施的空隙灌漿封裝。

法國

國家放射性材料和廢棄物管理計劃(Plan national de gestion des matières et des déchets radioactifs – PNGMDR)的目的是要找出所有放射性廢棄物和物料的長期管理解決方案，包括拆除廢棄物。該計劃提供方法，以確保整體廢棄物管理計劃和最佳化個別廢棄物管理步驟-包括貯存的一致性。通常，優先處置再利用和再循環的廢棄物，並且運營商都遵循一個提前拆除策略，遵守廢棄物管理場地的可用性。

然而，部分設施可能會產生、可能已經被活化或可能或被放射性物質污染的廢棄物，要求他們加強可追溯性管理，法國有一個具體的監管框架。因此，執行廢棄物分區來區隔設施的核廢料（放射性的或潛在的放射性廢棄物）的部分與傳統的廢棄物（沒有污染或激活的可能性）的部分。

PNGMDR 反映優先的需求為減少要處置廢棄物的體積，並給予國家處置設施的使用最佳化的需求及不同的廢棄物管理步驟的一個整體一致的方法。考量實現這種等級的最佳化，技術選項包括回收鋼鐵和混凝土、除污程序和處置大型組件議題等。

從 Chooz A 核電廠使用多標準分析技術，法國電力公司（EDF）已考量蒸汽產生器、反應器壓力容器的長期管理的選項。對於蒸汽產生器，參考選項涉及從低階廢棄物（LLW）到超低階廢棄物 VLLW 不予分類，當成一個單一組件的加以處置，比較的選項涉及切割（即熱切割牆壁和機械切割管束）。前者參考選項與後者相比，不僅需要一個更高等級的除污，還需要一個由法國放射性廢棄物管理機構(French Radioactive Waste Management Agency, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs – ANDRA)進行的平行研究，以確認該蒸汽產生器單一組件在 VLLW 貯存場處置是可行的。選定參考選項來實施，因為

在職業的劑量、拆除時間、廢棄物量和除役成本有顯著的利益，儘管除役成本這個因素因處置成本增加而平衡。

對於壓力容器，切割-除了容器頂部及容器底部外，與單一組件拆除比較。這是假設至少保留活化的內部組件在壓力容器中，而其他的將被放置在臨時貯存場。應當指出的是，在法國，壓力容器的頂部和底部，原則上當作 LLW 處置，但壓力容器內部組件則不是，只有地質處置是合法的。雖然許多因素有利於蒸汽產生器為單一組件來處置，例如，假定內部的 α 污染水準，由於潛在的人員入侵的風險，所以很難證明能在 ANDRA LLW 貯存庫處置。由於需要時間進行更廣泛的內部組件特性調查，切割選項是第一選項。

Andra 處置設施的安全報告和一般運行規則已經包含了某些類型的大型組件的處置，ANDRA 的 Centre de l'Aube (LLW) 在已經接收有限數量的壓水式壓力容器頂部，Morvilliers (VLLW) 已經接收金屬混凝土塊（重量可達 24 噸）。已估計未來的 20 年，盤點大型組件可能需要處置分別為 LLW 2,500 立方米和 VLLW 的 11 萬立方米。計劃尋求法國核安全管理局（French Nuclear Safety Authority, Autorité de sûreté nucléaire – ASN）的通用授權對設施為了方便處置大型組件任何的變更，包括經修訂的 Centre de l'Aube LLW 設施安全案例，及 Morvilliers 裏大型組件專用處置單元的可用性。

在 Centre de l'Aube 主要的問題為大型組件處置的可行性影響設施的作業和特性調查的要求的（以滿足從安全的案例下推導出的要求），及長期影響（尤其是入侵情境）。

英國

在英國，受輻射污染的大型組件與其他污染廢棄物以同樣的方式進行管理。需要決定特定類型的廢棄物進行管理的方式採取逐案的基礎，適當考慮廢棄物的性質。根據這些決定，國家對於 LLW 政策和策略提供指導和框架。在過去，像是位於 Berkeley 大型鍋爐大型組件已貯存在現場等待解決方案，或在 Cumbria LLW (LLWR) 貯存場直接處置。

在 LLWR 處置的大型組件灌漿後接進入施設直而不減少它們的大小，因而用完了寶貴的設施空間。近年來，英國已發展其核能產業 LLW 的管理的策略。這一策略透過應用更佳的廢棄物分級和使用廢棄物管理的替代場地，確保 LLWR 的空間容量更明智地使用。這些原則應用到大型組件，以及其他類型的廢棄物。對於大型金屬組件，這意味著更佳地使用減容和金屬回收廢棄物場。英國的 LLW 政策也顯現偏好早期的解決方案，這意味著長期等待解決方案不是一個有利的選擇。

在英國，透過多項創新來採用 LLW 策略。其中的一個為改變 LLWR Ltd 所扮演的角色，現在它不僅僅是處置而且提供了更廣泛的廢棄物管理服務。他們在全國統籌 LLW 管理中也有一席之地。根據這些新的安排，管理的大型項目，將受益於一個協調的工作方式。除役和廢棄物管理團隊，在現場產生的廢棄物以大型組件廢棄物的方式會緊密合作地協助 LLWR，以設計廢棄物管理的最佳方式。這已經發生在 Berkeley，其中 Magnox Ltd.與 LLWR Ltd.一同工作，以提供一個鍋爐涉及金屬回收的解決方案，。

在實際上，已經有很多的解決方案，用於管理大型組件。合作的關鍵，不僅要保證他們可取得最好的管理解決方案，而且還保留英國 LLW 的管理能力。

2.2.3 管理策略的關鍵驅動力

影響各國管理大型廢棄組件遵循策略的關鍵驅動力，雖然由 OECD/NEA 出現一些共享的國際形勢，以及 IAEA 的良好實行，一些國家有一些具體的限制，這可能改變本文中的一些確定的驅動力的重要性。

一個主要的議題影響所選擇的管理策略為是解除管制（或去除分類）和回收策略，這取決於所涉及的國家法規。當採用此一策略的目的—一般是減少放射性廢棄物管理的量：

- 處理除役的物料為了清除或去除分類這些物料，例如透過除污未再使用的組件
- 根據可用的管理場所來分離廢棄物，這表示若不是依照局部的分類不同類型來處置放射性廢棄物，就是回收。

根據選定的策略，大型組件管理的選項將受到另一個主要驅動力的影響，這就是廢棄物貯存及處理設施的可用性。像是利用放射性衰變可避免使用昂貴的遙控切割技術或使用人工進行只需較少的輻照防護要求。通過放射性衰變，解除管制可能通過，導致自由外釋或廢棄物不用分類，從而減少特定的類別的放射性廢棄物量。可能在德國發現此選項的一個例子（見第 2.2.2 章）。關鍵是要知道，在作出決定之前，臨時貯存設施是否已經可用或者是否需要專門建造它。另一方面，需要臨時存儲容量是一個缺點，由於其投資成本大，並且需這長期運轉此類設施。此外，為了最佳化除役工作，外部設施的大型組件專用的處理能力可能是非常有用的。

放射性廢棄物的最終形式由第三個關鍵的驅動力來決定，就是處置設施容納大型組件的能力。如果具這樣的能力（例如，美國、法國和瑞

典)的情況下,可以不需要為了標準化處理需全部切割。這可避免花費和工作人員劑量。然而,在所有國家,放射性廢棄物處置設施代表了稀有和寶貴的資源,因此總是給廢棄物減量和分類較高的優先等級。

然而,如果一個額外的,但主要的主要驅動力為運輸的可行性,妨礙使用外部貯存或處理設施與處置設施,將不會考量這些選項。大型組件的運輸可能需要適當的鐵路、公路、海運或國內河道運輸系統和發展適合的運輸容器。有需要制定廢棄物管理或運輸系統的要素,可能會導致除役計畫重大的延遲,而導致,可能顯著地影響成本。然而,在可能的情況下,有很大的不同取決於國家的框架。例如,在美國,現有的基礎設施可以從除役場址的臨時貯存設施搬遷大型項目至最終處置設施。瑞典也是有如此的情況,其中大部分設施都位於靠近大海,因此使海上運輸成為可能。在其他國家,如法國,交通問題可能是更關鍵。

經濟問題也是關鍵的驅動力,因為他們需要反映在整個廢棄物管理的所有階段的技術困難,包括安全和輻射防護問題。的除役和除役廢棄物管理的經濟最佳化應該也反映除役過程中選定的整體技術最佳化。

必須考量到盡量減少實施拆除的時間表並且可能是一個選擇大型組件管理選項關鍵的驅動力。通常,拆解大型組件是除役計畫的關鍵路徑,並且有相當大的興趣找一個標準選項的替代解決方案。標準選項就是完全切割和置於標準包件處理。減少現場切割作業,可能透過保存相當長的一段時間。此外,由於切割大型組件是一個複雜的過程,可能避免許多技術和安全危害,切割作業是被限制的,甚至最好避免。最後,對將來的除役作業,儘早拆除大型組件也將改善廠內的運籌。另一方面,也可能需要預備工作,特別是在安裝時,沒有處理和去除大型組件

的原本設計，並要考慮到這些作業的必要時間。通常來講，任何時程減少可能會造成職業劑量的限制。

2.3 在管理大型組件技術過程的主要相關行為者

誠如在前面的章節中，放射性廢棄物管理，在不同階段涉及很多行為者，包括運轉商、監管機關和一定範圍利益關係者。下述總結為本報告中考量的行為者，是基於簡短調查表和一些工作團隊的判斷的經驗。

- 核設施的運轉者。

不僅在設施的運過程中情況下產生的大型廢棄組件，例如蒸汽產生器，而且在除役計畫的情況下：

- 運轉者能夠提供最準確的廢棄物特性的資訊（例如，例如放射性含量），
- 當大型組件在運轉過程中拆除，在設施中有可能是共同的作業問題。

- 除役組織

在一些國家，如美國或西班牙的設施，責任已經或可能會從運營商轉移到另一個組織。

- 運輸組織

一般來說，運輸組織是除役組織的分包商，具有放射性物質運輸的資格，這取決於選定運輸的方法和進行旅程的性質。這可能包括跨越國界的運輸，涉及的選項，例如公路、鐵路、河流或海運。因此，除役組織可能存在另一個國家的公司。

在一般情況下，委託者負責符合法規，而運送人確保使用合格的人員和設備

- 處理及貯存組織

這項研究考量，位於除役場址外處理或貯存設施的可能性。

處理設施的營運者可提供服務，例如但不限於，切割、去污、焚燒和熔融。回收部分處理過的廢水的也是有可能的。

- 處置設施的營運者

處置設施的營運者負責確保處置的廢棄物符合所有具體的法規及貯存庫的廢棄物接收標準。在場內也可以提供其他處理服務。營運者也負責證明處置廢棄物有關的運轉安全性和貯存庫的長期安全性符合要求。

這份報告的用途，大多數 LLW 或 VLLW 的貯存庫都符合，但它可能也適用於垃圾掩埋場，如果此掩埋場授權放射性廢棄物處置。

上面提到的各種行為者在運轉方面的不同階段參與廢棄物管理。他們的職責可能是廣泛的，因為他們要準備從監管機關採用和取得相應的許可。

也有一些重要的利益關係者，包括公眾，可能影響廢棄物策略。在法國，這些利益關係者可能會參與法律或監管的框架內，像是廢棄物管理項目如本地信息委員會（Commission locale d'information – CLI）。他們可能還包括當地的代表。其他利益關係者可能通過非組織性或非正式的程序互動，如環境協會。所有利益關係者根據各自的敏感性，特別注意影響生活品質的決策。

這是所有國家共同的模式，雖然國家之間的結構可能有顯著差異。廢棄物管理機構在不同國家和不同的行為者扮演的作用：

- 除役過程中的責任（如義務管理、除役作業、運輸、廢棄物處理/存儲和廢棄物處置）；
- 內部現有和/或參與機構之間的控制機制，及除役策略的選擇的職責；
- 現場的安全監管、排放和處置方面的職責；
- 設施的所有權；
- 除役和處置計劃資金取得的職責。

很多時候，不同的行為者參與。然而，在一些國家，如西班牙，從除役設施的經營者轉移責任和所有權到一個單一的機構，此機構可能是在完全負責除役、廢棄物處理、貯存、運輸和處置。這種方法可能會整合一些作業，從而減少了個別行為者過程中區別責任範圍。

國家與國家間，管制核作業的做法可能顯著不同。在其中一些國家，是核運轉者的責任，證明他的應用的選擇的程序能滿足安全目標。之後，運轉者可以選擇的方法，例如長期安全性方案中，用於執行評估。申請需審查和監管當局的核准，特別是在西班牙和法國，在那裡申請有一個整體框架，作為運轉者的“義務目標”。在其他國家，例如美國，監管機關可能發布方法，有時甚至一些工具和標準核運轉者使用來支持申請。在這種情況下，運轉者完全清楚規則，儘管可能是缺少的靈活度，因為這些規則可能不包括所有情況。

正在實施的不同廢棄物管理流程涉及到不同的監管部門。這些當局的參與可能取決於不同的作業（例如，除役、運輸）。他們也可能涉及到不同的監管層級，國家、州或區域規模。此外，如果某些作業在不同的國家（即德國的蒸汽產生器在瑞典工廠熔化），有可能是涉及不同國家的標準，當這些國家無法共享相同的廢棄物管理策略，像是不同放射

性廢棄物清除標準，從而導致複雜的情況。越境轉移可能也將受國際公約約束，像是歐盟不同國家之間。

一個廢棄物管理策略的選擇，也會受國家資金取得制度的影響。在一些國家，第三方組織管理專用除役資金，而在其他國家，運轉者為自己的資金負責，即使一些外部控制檢查資金是否很穩固。由於參考除役情境證明資金在任何變化下可能涉及新的財務評估。根據資金取得制度及其控管的機構，也有可能在除役和廢棄物管理策略的選擇有更多或更少的靈活性。

國家架構呈現了明顯的驅動力，並在幾種情況有不同機構來考量，成為除役和廢棄物管理策略選擇過程的一部分。有關監管機關和利益關係者之間溝通要適合每個特別情況。然而，儘管有這些差異，要執行的技術工作在每一個國家並無不同，是有可能提出一些大型廢棄組件管理的一般原則和良好做法。

2.4 相關問題概觀

2.4.1 已不使用大型組件的管理策略

為了評估已不使用的大型件廢棄物管理策略相關性，必需研究不同方面，像是：

- 技術方面
- 監管方面
- 利害關係者方面
- 經濟方面

這些方面必需考量已不使用的大型件的各階段

- 除役，當已採用處理選項

- 運輸
- 廢棄物處理或貯存，不管是否在除役場址內執行
- 處置

2.4.2 除役問題

通常，除役組織已經建立一個包含所有廢棄物管理問題的策略。決定如何執行除役、切割及包裝大型組件，例如，取決於若干因素，包括：

- (a) 一次及二次廢棄物的處置方針
- (b) 安全問題，ALARA 原則維持達到儘可能低的作業暴露劑量
- (c) 成熟的和先前測試技術的可用性；
- (d) 原來電廠的設計；
- (e) 該計畫的時間下電廠的物理和放射性狀況；
- (f) 整體除役和拆除專案的時間表；
- (g) 財務方面；
- (h) 法規及申照的問題，
- (i) 公眾意見和利益關係者的考量。

必須考量設施在危急關頭的特別情況，檢查每一個因素，以達到一個滿意的拆除/切割大型組件計劃。下面簡要地討論各因素。

此外，廢棄物的處理，特別是使用除污。這種作業可能在場址內或場址外。在 2.4.4 節與處理相關的問題進行了討論。

- (a) 一次及二次廢棄物的處置

各國之間的法律架構對切割大型組件產生的產物之處置可能有很大的差異。這些差異可由每個國家的核可廢棄物處置庫具體廢棄物的接收標準來追查。此外，是否涉及一次或二次廢棄物會有不同考量。

儘管如此，一些不同的方法關鍵的原則是共同的，並涉及到最終處置的廢棄物量最小化。

在一次廢棄物的情況下，盡量減量，主要是涉及詳盡及準確的輻射特性調查及包裝的最佳化，包括包裝的新設計和許可及最佳化的切割策略。

對二次廢棄物，努力主要集中於把產生的廢棄物最小化和最佳化其處置。

由於在某些情況下，可能是一次和二次的廢棄物（例如，更多的切割，因而導致更好的包裝，可能會導致更多的二次廢棄物）的目標的符合之間的衝突，必需達到某種平衡，因此，考慮到所有介入技術和成本因素。

下面的段落處理這樣的考量和因素

一次廢棄物

一次廢棄物包含直接的切割產物，通常為金屬片或組件的形式

值得注意的是，在許多情況下，已經作出延遲活化爐內組件的拆除的決定，直到關機後幾十年，因而透過放射性衰變，降低了短半衰期的活化產物盤存。雖然以 ALARA 觀點，這是一個明智的措施，它可能對廢棄物處置的效果比較有限，長半衰期核種的存在極大地影響廢棄物處置。

國際上的經驗顯示，到目前為止，管理和處置大部分由大型組件切割產生的一次廢棄物為低階和中低階的廢棄物（LILW）。涉及長半衰期活化產物例外，例如存在於反應器壓力容器內部組件暴露在高的中子通量的零件，大多數國家，在這種情況下，已同意制定特別的管理標準，通常基於長期情境的處置庫性能。國家選擇處置選項，這些組件可能在

近地表 LILW 處置庫處置，如果放射性核種的比活度，例如鎳-59、鎳-63、鈮-94、碳-14 等，下面是特別規定（如 10 CFR 61）或貯存庫運轉商建立的接收標準限值。

管理任何殘留超過通常被稱為長半衰期/中低階廢棄物（long-lived intermediate-level waste）限制的共識是將它們貯存在專用的臨時位置，與從燃料循環結束的高放廢棄物（HLW），一起等待最終處置的地質處置庫。

通常，臨時貯存內進行貯存的鋼筒，類似於那些用於用過核子燃料貯存設施（臨時用過核子燃料貯存 - ISFS）。在其他情況下，它通常在特別但較小容器中執行。在所有情況下，產生的主要廢棄物放置在內部的托盤中，其內部結構、尺寸和負荷能力，對準備的對應之切割計劃有決定性的影響。

其餘的主要廢棄物，可能被列為 LILW 在近地表處置庫中處置，並按照相關接收標準管理和處置。

敘述一個大型組件 LILW 部分拆除策略時要解決的首要問題之一為涉及切割工作的程度。

主要受美國和法國的青睞一個可能的選項為：要不是在大型專用包件內或多或少保持完整的形式處置組件，就是準備讓組件形成自己的包裝件。特別是透過拆除反應器壓力容器作為 LILW 內部組件的容器或殼體，或其他大型組件，像是蒸汽產生器和調壓器在灌漿和密封後當作單一組件。

另一種選擇意味著廣泛的拆解和切割的組件，以使用標準包裝和固定/密封程序，使用核準的和處置庫核准的容器。

可以說有限制切割的方法，其結果為在處置大型物件上提供了實質的優勢，原則上，減少下列方面：

- 計畫的風險及不確定性
- 重型吊運及場外運輸的次數
- 透過作業的輻射暴露
- 整體的時程
- 整體的花費

在另一方面，這也是事實，這種方法存在了挑戰，其嚴重程度通常取決於特定國家的因素。這些缺點的例子包括：

- 新型大型“第一類”廢棄物容器的設計和許可或者是任何組件自身作為容器的資格可能被要求，因取決於該國的監管架關，或多或少需要一些時間；
- 根據原廠房設計（例如，蒸汽產生器的拆除，可能需要屋頂的開口），可能需要專用的重物吊運設備和新的廢棄物貯存場所；
- 超大型的容器可能需要特殊的運輸安排（例如，重量、高度、避免公共區域等）；
- 處置場所最終執照可能需要進行修改和開發新的接收標準，以允許新處置的容器或廢棄物類型；
- 處置場現場廢棄物處理設施和程序可能需要適合新的容器或廢棄物類型的 yêu 求，
- 根據新的包裝的幾何形狀和有效填充因子的達成，預期的最終存儲量的減量可能永遠不會發生，或幾乎可忽略。

簡而言之，貯存庫的接收標準和最終處置容器的可用性和設計特點，將是大型組件制定核設施切割計劃的關鍵因素。

二次廢棄物

二次廢棄物由切割副產物組成，包含任何除污的最終殘留物，通常的形式分類的材料、過濾器、離子交換樹脂。

在制定切割計劃，通常 LILW 貯存庫的接收標準是要考慮的主要因素之一，因為他們制定特別的要求，這些廢棄物最終的處理狀態和活度等級。

因高度活化的組件有更多明顯的挑戰，例如反應器壓力容器內部組件的切割過程中產生的碎屑。根據所使用的切割技術，碎片可能包括純金屬顆粒（例如，碎片、和從機械切削的銼屑），或金屬和研磨材料的混合物。實際上來說，所有的切割技術都產生濾芯式過濾器和離子交換樹脂的二次廢棄物，這是用來捕捉的最小的顆粒和溶解的材料。

因為其的高比活度，處理和處置的碎片可能是複雜的，在某些情況下，可能會危及其當成未經稀釋 LILW（例如，機械切屑）來整體處置，或者為了遵守運輸和處置現場的劑量率限制，可能需要處置容器方面顯著的屏蔽要求。

一個例子為，反應器壓力容器內部組件的切割計畫，處置砂礫的選項之一是將它們貯存、脫水（即沒有自由水），置於認證的大型“高完整性容器”（HIC）內。然而，這種方法可能並不適用於貯存庫需要廢棄物固化（例如，在水泥基材）的國家。這個因素的可能意味著，處置相同數量的二次廢棄物，會導致最終包裝的體積增加。

另一個例子為，在一些國家中，允許只有金屬的二次廢棄物貯存在用於貯存 LL / IL 一次廢棄物的相同處理和限制條件相同的容器中，像

是乾燥。這種方法是合乎邏輯的，因為同樣的材料只是在不同的物理形式。

因此，在選擇任何切割技術之前，必需評估伴隨二次廢棄物物理形式和相關特性，可能出現在指定的貯存庫處置廢棄物/包裝接收標準方面的影響，。

預期產生的二次廢棄物可能是大型組件的切割計劃制定過程中的一個重要依據，特別是在要決定是局限或廣泛的切割。很明顯第一個選項通常會導致二次廢棄物較少的產生，因此，降低廢棄物處理的成本、包裝和處置。然而，這些好處將被他方面的潛在的缺點所平衡。

總而言之，下面的列表中包括一些最重要的問題進行調查，一次和二次廢棄物處置方面，對大型組件適當的切割和包裝計劃之選擇和準備可能有很大的影響：

- 每一個可能接收的處置設施其廢棄物的分類;
- 每個處置庫目前核准的廢棄物包裝其物理特性和廢棄物分類;
- 任何最後封裝的接收標準，像是廢棄物處理、包裝外部劑量率限值、處理限制等;
- 使用廢棄物豁免標準的認定潛力，及
- 選擇任何切割技術對最終處置的二次廢棄物體積符合一般廢棄物最小化標準的影響。

(b) 安全問題，ALARA 原則和由於作業的暴露劑量限制

風險的避免和最佳化是重要的驅動力，優先於任何大型組件的切割技術和策略的選擇，以及之後來的實際執行。

大型組件的切割意味著處理重型的設備，該設備的內部或外部被活化和/或污染。因此，對任何牽涉它們，像是拆除或切割過程的部分，可以在不同的等級中包含不同的輻射風險，如：

- γ 射線外部暴露
- 內部暴露，包括 α 輻射的危險；
- 未受控制釋放在大氣中的放射性物質，及
- 污染擴散。

切割大型組件可能包括傳統的（即非放射性）的風險，如：

- 重負載掉落；
- 火災和爆炸；
- 設備故障或斷裂，
- 人員受傷，如跌傷、觸電、窒息等。

除了符合計畫既定的法規暴露劑量的限制，ALARA 也必須加以考慮。

良好的實行範例子以盡量減少上述風險，並證明符合 ALARA 原則包括：

- 準備足夠詳細的大型組件 3-D 模型的和所有的周邊廠房結構和設施；
- 使用這些 3-D 模型作為切割策略和拆除順序設計的一個不可缺少的工具；
- 考慮來自於可用的容器設計的潛在限制，最佳化切割的數量和長度，以盡量減少介入的次數和期間；
- 在處理活化或高污染的組件，優先選用冷切割，而不是熱的方法；

- 設計的切割設備是高效率及操作安全，以及便於維護和修理;
- 水下切割活化組件-如果可能的話，用足夠的水作為屏蔽;
- 所有在空氣中污染組件的切割作業，使用臨時密閉或高效率微粒空氣（HEPA）過濾結構;
- 盡量減少使用的液體燃料或氣體燃料的切割設備;
- 在開始工作之前有適當的工作計劃，包括訓練、工作團隊的組成、詳細的工作程序等
- 參考以前類似的計畫至關重要，運轉者和監管機關兩者也應考慮。

以下是一些最重要的問題進行調查，從風險管理的角度來看，ALARA 原則和輻射防護、以及可能的切割和包裝計劃的選擇和準備有很大的影響：

- 大型組件原始施工或建造圖的可用性;
- 大型組件活化和/或污染的放射特性調查的，及
- 工廠的重物裝卸設備（像是起重機、工作平台等），以及設備的更換及重新認證的實際狀態

輻射和傳統風險評估也是影響侷限和廣泛的切割選項之間決策過程的關鍵因素之一。原則上，侷限切割選項應該有一些優勢，由於預期較小的工作量和公眾劑量，但會與傳統風險的增加相平衡，像是預期有關吊升和處理重物。

(c) 成熟和先前測試技術的可用性

大型組件的切割，意味著大量的難以進入厚的不銹鋼或碳鋼組件的切割作業和處理條件。此外，高度輻射照射不銹鋼組件可能具有輻射固化的影響，可能會影響標準切削工具的性能。

另一方面，包裝最佳化標準通常的目標是減少的直接切割廢棄物的最終體積。這些標準的應用程序通常會導致精確的切割計劃準備，及有限的偏差幅度。

此外，作為切割系統的不同組成部分的可靠性、耐用性和彈性等方面也必須被考慮，由於其可能造成如期的、風險的影響，並且輻射影響可能有設備故障和/或維護。

因此，執行不同的切割技術及可用設備的該類型服務可能供貨商的調查是非常重要的。此調查的一個重要方面為，將以往使用類似或相關工程技術資訊收集和評估。

在調查中加以考慮和評估的主要方面包括：

- 切割設備的性能和限制（例如，最大的切割寬度、相對厚度的切割速率、熱和氣體的產生等）；
- 切割件的相對厚度，磨耗零件的預期壽命，例如鋸、盤、噴嘴、電極等
- 為切割精度和穩定的效果，切割設備定位和約束的要求，；
- 易於維護和除污的設計目的，
- 切割副產品的特性，包括任何所需的輔助材料，例如顆粒磨料。

下面的列表包括一些最重要的問題進行調查，從切割技術的成熟和需求的角​​度來看，因為他們可能對大型組件的切割和包裝計劃的選擇和準備有巨大的影響力：

- 以往的使用經驗的可用性和詳細的報告分析，說明實際切割性能參數（例如，切割速度、導致二次廢棄物的產生等），以及任何遇到的重大問題，包括肇因分析；

- 使用特定的測試計畫的範圍，要求驗證在此設施的選定的一種或多種方法（例如相當實物模型）；
- 在裝置中二次廢棄物之間特性的相容性與目前可接受的廢棄物管理的做法，
- 選定的切割技術，例如空間、支撐、定位和控制設備、輔助設備，限制等要求

(d) 原電廠的設計和吊運系統

舊核電廠和其它設施的設計常不考慮除役和拆除方面。一個例子為，舊壓水式反應器，並無便於拆裝或更換一些大型組件的設計，如蒸汽產生器，新的設計則相反。

對舊電廠的設計，考量 ALARA 原則在一些組件（例如，反應器內部）定期檢查和維護，有較小的影響。另一個例子是，反應器的輔助腔在一些舊壓水式核電器的設計意味著較低的內部，在每十年一次的檢查此部分將排水。這是新電廠將腔設計具有較高的洪水深度的原因。這個從經驗轉換設計的教訓，是一個顯著影響拆解方法的特點。

舊電廠也可能缺乏一些現在在新電廠的處理功能，如高容量的極座標起重機和大型設備出入口。

很清楚地，電廠的設計，尤其是佈置和結構的支撐，對一個成功的大型組件切割計劃準備上有決定性的影響。尤其是，當考慮：例如去除大而重的組件，像蒸汽產生器，作為單一組件。

因此，電廠設計的審查是非常重要的，因為它可能會影響大型組件的拆卸和切割，如此才可以得出一個合理的規劃。作為此審查的結果，要求在工廠中任何結構上的修改和新的裝卸設備將被識別。

在審查中加以考慮和評估的主要方面包括：

- 工廠的吊裝和搬運重物的系統，其中包括最大負載能力和可作業性評估；
- 圍繞大型組件隔間的可接近性（例如，可拆卸砌塊牆壁、出入口、平台等）；
- 重新評估空腔的充溢高度，及
- 當前核電廠系統的設計，視為大型組件的輔助設備，如清理空腔水，和可能升級的評估

下面的列表包括一些最重要的問題進行調查，從原電廠設計的角度來看，因為他們可能對大型組件的切割和包裝計劃的選擇和準備有巨大的影響力：

- 現有廠房的結構和設施及原始施工圖或建造圖的可用性
- 如果需要的話升級現有的吊升和搬運系統的可行性；
- 如果需要任何考量的選項，新的入口和搬運系統及路線的可行性分析，包括結構分析；
- 核電廠系統施工或原設計資訊的可用性；
- 以往的設計變更的詳細記錄以及其可用性
- 一個全面的核電廠”漫遊”通常是必需的，以便確認設計資料。

(e) 核電廠除役計畫時物理和輻射狀態。

在執行計畫時核電廠的的物理和輻射狀態，對一個適合的切割和包裝計劃的範圍，也將有顯著的影響，。

因此，它是非常重要的，執行計畫時執行預期的物理和輻射狀態調查。作為最低要求，該調查應考量各方面如：

- 任何切割系統和設備的任何可能的過時及/或退化；
- 空腔及水池的任何密封性功能退化；

- 在隔間中和一般可進入區域背景輻射水準，
- 存在額外的未正確特性調查的品項，要包含此計畫的範圍，例如反應器運轉產生的廢棄物，這可能需要特殊的處理（例如，鋳合金品項）。

進行調查的一些最重要的問題，考慮到核電廠的物理和輻射狀態，因為它們可能會影響切割和包裝計劃，有：

- 重物搬運設備的認證和檢查；
- 受影響的核電廠系統維護記錄；
- 近期全廠範圍的輻射測量數據，並
- 通常需要全面核電廠”漫步”來評估整體核電廠的狀態，它可輔以電子檢測，像是三維雷射掃描。

(f) 整體除役和拆除計畫的時間表

整體進度要求，也可能影響大型組件選擇切割和包裝的策略和技術。

(g) 財務方面

從監管的角度來看，應用方面雖然沒有或有限考量財務方面和約束，應該確認是一個整體業務決策方面的主要驅動力，並在選擇適合的切割大型組件的包裝技術和策略，可能有決定性的影響，。

這種影響通常是由於以下因素：

- 一些切割技術，由於使用先進和昂貴的設備，可能會導致比別人高的前置成本，；

- 但是，因為它們可能代表一定的優勢，在其它領域，例如輻射影響、減少二次廢棄物、切割時間和精度等，它們具有較高的成本可能由其他考慮因素所抵銷；
- 所需的核電廠修改的成本和時間表的影響也必須說明和考慮，尤其是當比較不同的替代品。一些修改，特別是那些涉及建立新的搬運結構，或需要使用外部重負荷起重機，可能代表了整體成本的主要部分；
- 一些切割技術可能有更高的風險，如果被證明，可能會導致廣泛的延誤或清理工作，從而產生供應商或負責核電廠實體的財務風險，，供應商或，
- 處置直接切割廢棄物所需的類型專門容器的設計、申照、採購、運輸和搬運可能代表一個非常重大的計畫總預算的一部分。如上述，用於切割和包裝計劃的方法明確地將有決定性的影響。

因此，詳細的財務評估，適當考慮到這些類型的因素，也應該是整體決策過程的一個組成部分。

(h) 監管及申照問題

大型組件的切割和包裝計劃是有關設施總體除役和拆除(D&D)安全計劃不可切割的一部分，因此，受核照當局的審查和核准。最重要的審查問題為遵守適用法規：

- 工作人員和一般公眾的輻射防護；
- ALARA 原則；
- 例行和意外的輻射釋放；
- 非輻射風險和安全問題；
- 組件和系統的品質保證；

- 安全的領導和管理;
- 人的表現，
- 運轉的回饋

切割和包裝計劃可能需要新設計的特定容器，須經發照機關審查和核准，方可使用。根據涉及容器的類型，以下三種類型的許可證可能需要，每個有其標準和先決條件：

- 現場的臨時貯存;
- 運輸到處置設施，
- 最終處置。

核照機關通常會審查和核准特定介面的過程，例如：

- 在現場容器的裝載，處理和封閉;
- 運輸前重新包裝以符合適用的交通法規，
- 在處置現場的重新包裝作業。

執照和選擇選項之間的相互作用是特別重要的，當新的某型類的”第一個(first-of-a-kind)”包裝或流程需要獲得核准，（例如，大型組件當成一整體來處置）。通常伴隨較長的時間核准此方法，意味著與核照機關進一步探討，以盡量減少計畫風險，或拒絕已提出計劃重大變動的請求。

(i) 公眾接受的考量

有時根據公眾對核了相關的問題的敏感性來選擇一個切割和大型組件的包裝計劃，解決此方面可能是明智的，如例所示：

- （輻射）風險可能會加劇公眾的反感，如果顯眼的大型輻射標記的容器用來運送大件遠離現場（減少切割）；

- 人們往往更容易地接受了許多“正常大小”容器分散在不同的裝載，雖然，其實其影響和風險可能略高;
- 靠近人口密集的地區，取出大型組件所通過圍阻體建築的大開口，可能會產生一些人的不安，
- 切割技術和策略的使用，明顯是較回收（例如，通過廣泛的切割和分離）來的有益，也可能是市民較可接受。

2.4.3 運輸問題

2.4.3.1 監管問題

前面的章節中說明運輸的重要性並且需要儘早考量。從國際原子能機構規定應用的監管問題，特別是於 1996 年發行的安全標準系列 No. ST-1：放射性物料安全運輸規則。所有國際運輸法規論及每一種運輸模式，基礎是建立在這些法規上，所有核廢棄物的運送，包括大型組件，執行應與其一致。

根據這些規定，關於大型組件的主要困難，包括：

- 活度限值，特別是 A2 值（Co-60, 0.4 TBq）方面的情況，和污染限值。例如，組件-例如罩蓋或蒸汽產生器-當作工業包件運輸允許的最大活度是 40 MBq/g，以及不可接近表面的非固定污染應不超過 $\beta\gamma$ 輻射源 800 kBq/cm²，和
- 劑量率的限制：
- ≤ 10 mSv/h，在廢棄物 3m 遠沒有任何保護;
- ≤ 2 mSv/h，在包裝或運輸容器接觸點，及
- ≤ 0.1 mSv/h，離包裝/容器 1m 遠或車輛 2m 遠。

符合這些條件有利於運輸工業包裝（IP1 或 IP2）。如果這些標準中的一個或幾個是不可能的，應使用 B 型包裝（例如，運輸用過核子燃料筒），但是因為過於複雜和昂貴的運輸，當只有一個或幾個大型組件，此方法是不適當的。

運輸大型組件的工業包裝，當作“表面受污染的物品（SCO）”或“低比活度（LSA）物料”（在從活化）的活度結果，根據分類範圍的情況下，在技術上並不難。在正常條件下的測試程序，以證明符合圍阻的目標不是太嚴格，如有確保證明困難，可與監管當局特別安排協商。

如果被列為 SCO1（根據原子能機構運輸條例），並遵守劑量和表面污染的限制，沒有任何包裝運輸組件是有可能的，。

2.4.3.2 技術和作業問題

技術和作業方面的問題，來自於大型組件的尺寸和/或重量、包裝、搬運和基礎設施涉及各種設備。

包裝

主要問題包括：

- 設計符合 IAEA 運輸法規（主要是不同的測試後達到目標要的包裝及適合不同特性，例如不同切割件尺寸和重量（有時超過 100 噸））；
- 要傳輸的物品與運輸裝置的尺寸和重量之間的相容性。這些約束可能需要組件切割或除去其中某些部分（例如，爐心組件），並
- 如有必要需有屏蔽的設計，既要適合限制劑量率並與運輸方法重量限制一致。

裝卸

造成不同的問題主要來自於交通工具（例如，運輸方式，多重模式運輸等）：

- 靈活性：根據包裝後的大型組件的重量，不同的方法將可在不同運輸階段（裝載、運送、卸載）。在多重模式運輸（公路/鐵路，公路/海等）的情況下，裝卸方法應適應不同的運輸方法。
- 安全性：在發生事故的情況下，需要移除包裝件，這可能是一個獲得運輸許可的情況。因此，定義的不同的介入條件和不同方法，但用於重負載的裝卸裝置，不一定在短暫延遲就可輕易獲得。

運輸工具和基礎設施設備

運輸模式導致不同運輸方法和基礎設施設備的問題。每個都有其的優點和缺點，如表 2-1 描述。

表 2-1 大型組件不同運輸方法的優點與缺點

	海運	公路運輸	鐵路運輸
優點	<ul style="list-style-type: none"> • 位在岸邊或進入合適的港口的核設施和接收設施，適合非常沉重的組件，使用高負載量船舶，在這些例子中被證明是引起興趣的 • 當海上運輸系統是用於其他核運送（例如，廢棄物和用過核子燃料），它已經是“系統內”，可以很容易地也用於運輸大型部件 • 隨著已經使用的交通系統，單一的大型組件將運輸成本受到限制， <p>駁船運輸的特殊情況：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 比船舶更高的可用性 • 更好的高負荷能力 • 在運輸過程中沒有船員（輻射防護） 	<ul style="list-style-type: none"> • 靈活性：可用的方法，多重模式介面 • 直接運送（“門到到”） • 易於監管（例如，按照特殊安排要求） • 成本 	<ul style="list-style-type: none"> • 高的安全等級 • 成本 • 靈活性，如果核設施連結鐵路網
缺點	<ul style="list-style-type: none"> • 成本昂貴，但如果用於其他貨運船，但在這種情況下，非獨家的使用證明可能是困難的 • 靈活性：船舶的可用性，特別是在獨家使用的情況下，時程很長，流動化成本是非常高的 <p>駁船運輸的特殊情況下：</p> <ul style="list-style-type: none"> • 運輸時間較長 • 在負載進出作業間期，駁船沒有壓艙物 • 需要拖船及適合協助拖船 • 沒有標準的海洋緊固件可用 	<ul style="list-style-type: none"> • 重載/長的車輛：他們的使用可能會出現公眾工作和土木工程（橋樑，十字路口，等） • 航程與車隊（總重量，寬度）的特性，有時可能是不兼容的， • 交通限制（天氣，法規）。例如，在法國，11月和3月之間禁止運輸壓力容器頂部 • 安全性低於其他模式。 	<ul style="list-style-type: none"> • 斷斷續續的拖運 • 鐵路網並不是完全適用（隧道/大容量） • 多重模式運輸的情況下的裝卸系統可用性

2.4.3.3 經濟問題

經濟問題應考慮以下相關運輸來評估，如特定包裝的開發和建造，包括程序測試，以證明遵守交通法規和特定裝卸系統的發展。也應該進行切割後的標準包裝的成本與運送比較。

此外，必須考慮廢棄物的最終目的地。因此，如果臨時貯存設施在核設施內或在附的，或是核設施遠離處置設施處，所選擇的策略可能會不同。

2.4.3.4 公眾接受問題

運輸策略的公眾參與是非常重要的。有些規定實際上可能引發一些疑慮：

牽涉大型組件的運輸意外（不論運輸模式，主要都是公路運輸），或任何需要的公開工作以允許車隊通行。

因此，公眾的接受是必要的，將導致不同的運轉商（核設施場址，運送人），利益關係者和公眾之間盡可能最廣泛的交流，不僅鄰近設施參與運輸，而且包括接近轉運點和通過區域，就像建造區一樣。

2.4.4 廢棄物處理和貯存問題

廢棄物處理和貯存的最終目標是準備讓大型組件滿足解除管制、再使用的等級或放射性廢棄物最終處置的接收標準。

2.4.4.1 監管問題

解除管制水準的相關監管問題參考 IAEA 排除概念的應用，豁免和解除管制的概念被稱為 IAEA's Application of the Concepts of Exclusion,

Exemption and Clearance (IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.7, IAEA, Vienna, 2004)。具體地量化清除放射性核種水準是基於國際公認的 10 微西弗的概念，這意味著，公眾輻射不得高於約 $10\mu\text{Sv/a}$ 。

由於在 IAEA 指定解除監管控制的水準，很難實踐量測許多不同放射性核種，具體程序和做法都必須事先經監管機關和獨立專家制定和核准。此外，自由外釋的過程下進行嚴格的品質保證計劃，並定期由監管機關和獨立專家審核。4.5 節中發展放射性廢棄物最終處置接收標準的有關問題。處理，調和和貯存需在涉及場址和/或的設施的許可的規定下進行。

2.4.4.2 技術及作業問題

技術和作業問題關注除污、切割、廢棄物處理和製程。這些作業可在場址內或場址外進行。需有有設施許可適當的授權。所涉及的技術和製程的選擇需要完整的了解要管理的組件的物理、化學和輻射特性。

除污

除污技術/製程不僅可以使用減少劑量也可以回收材料或組件。在第一種情況，涉及 NP P 主迴路的除污，其中包含活化和/或受污染的組件兩者。在第二種情況下，除污技術應用於污染的組件，以滿足自由外釋放水準，以及熔融的接收標準，既用於自由外釋放及回收，或者是降低放射性廢棄物的分類。主要的問題是選擇一個合適的除污技術或製程來實現所選擇的目標，而不會產生任何其他問題，被證明是難以管理，例如二次廢棄物（參見 2.4.2 節）。

- 優點：
 - 回收材料;

- 在接下來的步驟（例如，切割、運輸），減少劑量及輻射的危害，
- 減少切割、運輸、貯存和處置成本。
- 缺點：
 - 除非在一個專門的工作間進行除污，當場址使用除污技術，可能影響規劃，；
 - 產生二次廢棄物，可能是難以處理，可能會導致額外的人員和成本方面的要求，從而造成額外的風險；
 - 產生新的的風險/危害（例如，放射性塵埃和懸浮微粒、化學危害），需妥善管理
 - 在除污過程中產生額外的劑量。

切割

組件切割的程度決定於所選擇的移出路徑的每項工作（例如，運輸問題、處理、貯存和/或處置的設施）的接受標準。

- 優點：
 - 較佳的廢棄物分離特性並減少廢棄物成本；
 - 簡化裝卸、包裝和運輸問題，並
 - 容易處置。
- 缺點：
 - 耗費的時間、劑量和成本；
 - 產生新的風險/危害（例如，放射性塵埃和懸浮微粒、觸電）需妥善管理
 - 產生二次廢棄物。

處理

處理的目的是回收有價值的材料，以盡量減少放射性廢棄物的體積：

- 自由外釋熔融（例如，鋼錠符合非核產業回收的接收標準 [Studsvik, Sweden; Siempelkamp, Germany]）；
- 熔融再利用（例如，鋼錠符合核產業再利用的接收標準 [Energy Solutions, U.S.A.; Siempelkamp, Germany]）；
- 熔融以減少體積（例如，鋼錠符合直接處置的接收標準 [Centraco (France)]），
- 使用壓縮或超壓縮技術減量。
- 優點：
 - 回收材料，以及
 - 減少運輸、貯存和處置成本。
- 缺點：
 - 產生二次廢棄物需要妥善管理（例如，過濾器、礦渣）；
 - 伴隨熔融金屬產生的風險/危險，
 - 產生額外的劑量。

調和/包裝

調和/包裝的目的是為了滿足處置的接收標準。包括的放射性廢棄物的固化到一個主包裝和/或處置目的最終包裝。在一些國家，固體廢棄物直接包裝，變成直接處置的大型容器（約 20 立方米容積）。在其他國家，處置前先調和及包裝至 200 升或 400 升貯存桶再裝入大型容器。在大型容器中的固體廢棄物的直接包裝和調和，可能會導致大量減少處置的最終體積。也最大限度地減少職業的劑量，縮短了切割時間，因此，降低了成本和風險。調和和包裝的一般優點/缺點是：

- 優點：
 - 提供放射性廢棄物周圍額外的屏蔽；
 - 整體強化處置包裝；
 - 延緩放射性核種釋放到生物圈。
- 缺點：
 - 時間、劑量和成本消耗；
 - 產生二次廢棄物。

貯存

貯存可能是一個必要的階段，符合自由外釋接收標準（即衰變貯存），或提供一個安全的尚未決定的處置場址的可利用性的解決方案。貯存可以在場址內或外進行。

- 優點：
 - 設施進一步的除役；
 - 藉由檢視小設施的小體積包裝/調和廢棄物來比較除役設施的體積來減少污染分散的風險。
- 缺點：
 - 耗費成本；
 - 產生二次廢棄物。

2.4.4.3 經濟問題

為了充分評估經濟問題，應該進行成本效益分析。這種分析不僅必須考慮到直接相關的成本，也包含工作人員的保護（暴露劑量），人口和環境有關。

2.4.4.4 公眾接受問題

公眾關注的主要問題都涉及場址上運輸放射性廢棄物（頻率、暴露、使用限制）進入及離開，以及污水排放。公眾也對當地的就業很敏感。必須採取充分的措施告知公眾有關的作業和所涉及的風險，並回答他們的關注的問題。

2.4.5 處置問題

2.4.5.1 監管問題

在一般情況下，發展處置設施的和其安全性的案例，包括建立廢棄物接收標準（或廢棄物包裝規格），描述了廢棄物包裝必須符合的條件，才能被處置設施接受。在大多數情況下，這種方法是基於標準的包裝。此包裝標準的變動需要一個適宜性評價，對設施安全的案例下進行處置。在許多國家，廢棄物接收標準送交監管機關核准並成為貯存庫許可證的一部分。

在大多數情況下，廢棄物接收標準與標準包裝相關，也就是說在正常作業期間在設施內可能產生廢棄物的包裝，或負責長期廢棄物管制機關優先指定的包裝。例如，在法國，Centre de l'Aube Disposal Facility 的設計考慮到了核設施內調和的金屬或混凝土包裝；在西班牙標準包裝為 200 升鐵桶及外包裝組成的一個水泥的處置包裝，而在英國，標準包裝由核除役管理局放射性廢棄物管理會所指定。

由於大型廢棄組件一般不適合在標準包裝的概念，處置設施的執照項目有可能沒有考量到，因此，執照可能不包括容納大型廢棄組件的任何授權。

除役計劃的評估包括大型組件的拆除，因此，任何技術調查前，需要要確認監管制管框架內的貯存庫內是否允許適用於處置大型組件。這意味著，應實施除役和貯存庫營運者之間非常早期的協調，應當認為是非標準條件模式。

如果雙方（除役組織和貯存庫營運者）同意制定這樣一個非標準選項，之後貯存庫營運者應分析他執行何種監管過程中，例如：

- 提交給監管機關一個特定的授權文件，或
- 向監管機關提交一個特定的授權文件，包括第三方參與（即公眾），例如，可能需要一個公共的查詢。

該資訊是必要的，以評估過程的持續時間和潛在風險。除役組織會比較預測規劃及其預期目標。

例如，早在 1994 年，在法國，由法國電力公司（EDF）和 ANDRA 考慮選擇直接處置壓力容器頂部。該選項沒有涉及 Centre de l'Aube 處置設施執照的審查，即使必須發展特定貯存庫，但是，監管機關要求安全文件需經核准。在 2001 年得到核准，並在 2004 年處置第一個壓力容器頂部。由於監管過程的冗長和貯存庫的建造，EDF 不得不實施的貯存解決方案。

2009 年，所涉及的風險和冗長的程序，導致 EDF 放棄了直接處置的 Chooz 反應器的壓力容器。

在美國，處置 Trojan 反應器壓力容器，需要檢討的反應器壓力容器內的廢棄物分類（例如，C 類或 GTCC）。還需要遵守美國交通法規的

B類包裝認，以允許 Trojan 核電廠的反應器壓力容器及其內部組件的一次性運輸，運送到美國 Ecology 公司場址(Hanford, Washington)進行處置。

證根據證書作為，為了讓，其內部處理中美生態，華盛頓州的漢福德廠址。

在西班牙，ENRESA 的認為，早在 José CabreraN 核電廠 D&D 計畫，在 El Cabril 貯存庫的 NSSS 大型組件，使用非標準的超大貯存容器用，最少化分割可能性。由於標準化的緣故，發展單一包裝容器的設計並使用在所有組件。

這種設計類似於一些以前的“hat-box”的容器，就像前面提到由 EDF/ ANDRA 處置的反應器壓力容器頂部。但是，可預見申照過程期間，及在 El Cabril's 的貯存庫設計和作業的影響，導致 ENRESA 到取消 José Cabrera 核電廠使用方法，並採用較為保守的做法，包括 El Cabril 使用標準包裝，雖然這將花費較多切割。

2.4.5.2 技術可行性

如果採用有足夠的技術方法的，可達成的技術可行性。可能會導致顯著增加額外成本，必須考慮選擇最相關的廢棄物管理場地，。

然而，現有設施進行調查採用新的廢棄物流程的可行性。因此，必須考慮大型組件其處置隔間行程的不同順序，例如：

- 如果需要的話，通過一個處理設施從入口運輸至處置隔間。

根據公共領域（火車，輪船，道路）的運輸模式，卸貨過程中，如果需要的話，運輸到處置隔間須加以評估，以確定設施需要進行哪些修改：道路壓力，道路寬度，燈柱等的障礙。

在瑞典，擴充現有的 SFR 處置設施的目的不僅是為了容納除役廢棄物，也來自運轉和維護。設計將考慮到可能處置的大型廢棄組件。現有的兩個入口隧道對非常大的組件-如反應器壓力容器-而言太小。因此，已決定興建第三條隧道，有著雙重目標，處置大型組件，及便於移除挖出的岩石而不會干擾現有倉庫部分作業。

- 處置模式

一般而言，標準包裝的處置結構設計沒有修改，就無法接收大型組件。處置大型組件的一個選項，採用現有的處置隔間。另一種辦法是設計專用的處置隔間，以容納一種類型或不同類型的大型組件。後者可能是有用的，如果在現場進行額外的調和，因為它不會影響標準的廢棄物交付。然而，這兩個選項，要研究投資和處置設施的正常運作整合兩方面。

通常於每一個特別的項目可採用不同的裝卸技術。執行發展選定的裝卸技術需搜調查用於除役場址的裝卸技術以保持一致性。

在 Centre de l'Aube，反應器壓力容器頂部放置在專用的處置隔間內，用專屬的搬運工具。然而，保持標準包裝完全一樣的處置原則。處置庫內進行調和。頂部的內部和外部空間使用幫浦灌入水泥，放置在處置庫。

對於其他大型組件，使用標準的處置庫。廢棄物可用標準處理起重機事先佈設標準的廢棄物包裝或在處置庫牆壁建造之前水平放置於處置庫。

2.4.5.3 安全問題

作業安全

必須發展符合當前處置設施營運安全選項處的理技術和調和技術。這是正確的，尤其是可以使用的包裝系統如果在現場進行調和。

一般來說，所有在處置現場由大型組件管理造成的危害，必須進行評估並採用預防措施。這是一個很好的做法，審查確定標準廢棄物的危害，並採用在大型組件的特殊情況上。這樣的審查，可能無法有一個通用的方法，因為每個廢棄物可能涉及特別問題。

安全作業的一個有趣的指標是核對工作人員的暴露值與標準的廢棄物包裝選項相比，尤其是當不可能使用遙控處理系統。

長期安全

在一些國家，廢棄物調和的主要目的之一是提供圍阻保證不管是廢棄物的形式（例如，嵌入基材中）或是廢棄物的包裝（例如，水密性的金屬包裝，圍阻性質的一個混凝土容器），從而解決在貯存庫中的循環水可能分散放射性核種的後果。

分配調和廢棄物的功能和性能可能會隨時間而改變。比如，根據廢棄物包裝圍阻的活度等級可能有所不同。在法國，II 廢棄物圍阻應證明，而為 LL 廢棄物，只需要做好調和。目前還同意在近地表處置庫的情況下，圍阻特性會因長時間而逐漸喪失，長期安全性主要依賴的殘餘活度。

處置設施的行為的描述 - 有時這可能是慣例 - 是有道理的，因此，考慮到設施長期水域傳遞情境的潛在影響，需做調整。

因此，在大型組件的情況下，應檢查調和模式是否符合標準廢棄物的安全評估所作出的假設。否則，必須執行特定的安全性評估。

標準廢棄物通常是埋置於基材中，盡可能將空隙回填。這種類型的調和模式確保圍阻和機械的強度。當熱交換器考慮作為單一組件處置時，必須考慮到一個事實，即會污染主要是發生在管道內，在此回填是非常困難的。透過熱交換器潛在的水通道需進行審查，以選擇最適當要使用的調和過程。

對於近地表處置庫的安全評估包括調查任何誤闖設施。標準的廢棄物包的開發方案可能是不相關的，特定情況下，可能要考慮。比如，發現一個大的金屬片的潛在後果可能有要處理的作為再利用的活化或受污染的金屬在熔融設施。

大型組件的處置有關活度濃度的計算為關鍵問題。選擇切割時，廢棄物的體積和重量是有限的，因此可以認為污染或活化是均勻的。關於大型切割組件處置，假設將不再有效，如何計算的活度濃度將是非常重要的考量。這是特別真實的，在一個單一的設備，如反應器壓力容器具有其內部組件或與蒸汽產生器它的管束，活度範圍很廣泛。

常用的方法來評估一個無意入侵的危害是考慮放射性廢棄物包裝與混合其他材料。因此，廢棄物包裝是透過包裝的總質量的活度比例計算相關影響的比活度。然而，當廢棄物的污染或活化位於一些特定部分（例如，在一個容器的內表面），這樣的方法可能不適當，在一些情況下（例如，熔化的情況）並可能導致在中要考量特定比活度的低估。因此，安全評估能是必要制定特別的情境。

2.4.5.4 廢棄物接收標準

誠如監管問題的情況下，一個很好的做法為在處置設施的設計階段做為正式的技术要求，主要假設需考量廢棄物包裝。這些技术要求包括特定設施的安全是非常重要的參數和價值。他們通常被稱為“廢棄物驗收標準”。

因此，引進新的廢棄物形式，像一個大型廢棄組件，導致在對此廢棄物形式一個特定的技術要求的發展。顯而易見的有一些參數，這些參數與處理安全性（像是，廢棄物的最大質量）相關。尤其是，如果調和在現場進行，因為包裝的一些參數可能會影響調和過程中的安全性。

2.4.5.5 處置空間的使用

當比較不同的大型廢棄組件管理選項，使用處置空間應予以考慮。一般來說，廢棄物處置費用取決於佔用當前運轉設施的空間，但不包括取代現有的設施的成本。然而，很顯然，任何放射性廢棄物處置設施的實施是一項艱鉅的責任。因此，在一些國家，監管架構指出，處置設施應被視為一個稀有的資源。

比較需要一個大型廢棄組件作為一個單一組件的處置空間，標準的廢棄物包裝分割後處置，減少棄置廢棄物的體積是很好的做法。

2.4.5.6 處置費用

廢棄物管理是除役計劃的成本一個重要組成部的。根據方案的複雜性和國家的具體情況，它可能會有方案的總成本的幾十分之一的變化。

因此，被認為是一個非標準的處置方案時，用標準的處置方案進行成本比較是必要的，因為必須考慮到額外的成本，如：

- 可行性研究及核照程序研究的成本;
- 無論是原封不動或是大型切割件的大型組件的輻射特性調查相關的成本，（例如，大面積/體積伽馬測量專用設備，難以達到的位置擦拭樣品，等等）相較而言，較小及拆除件特性調查較容易;
- 所需的額外投資的成本（專門處置庫、處理系統、空調系統等）;
- 在處置過程中的人力和物力成本，
- 由於處置空間的使用，倉庫的折舊。

處理大型組件策略選擇時的總體成本，必須考慮到，包括：

- 設施由可能在現場更快的處理和縮短的整體拆除時程所節約的成本;
- 如果選擇分割，一次運送與多次運送相比的可能性，並
- 貯存/處理設施的投資和營運成本。

2.5 作業的相互依賴性和整體最佳化

在前面的章節，在廢棄物管理的每個階段，大型廢棄組件可能的管理模式的優點和缺點進行了回顧。這些階段分別考量，一般都超出不同的運轉者和可能不同的監管機關的責任。

- 在除役場址內切割及使用標準包裝貯存或處置;
- 從除役場址以一個單一組件拆除，之後場外處理或貯存。之者的步驟可能會整體或切割後處置，
- 從除役場址以一個單一組件拆除，然後就直接處置。

可以執行的評估的基礎上，評估矩陣描述在下列表格中。

這種做法應在逐案方式。這不僅取決於除役設施大型組件本身及現有的情況，並且取決於貯存或處置的機會，評估結果可能會有所不同。

評估矩陣（表 2-2）認為在前面的段落被認定的主要問題。這些主要問題包括：

- 監管及申照的問題;
- 技術和業務問題;
- 安全性 ALARA 問題;
- 經濟和時程安排方面的問題，
- 公眾接受度和利益關係者問題。

這些問題應考慮（即除役和拆除、廢棄物運輸、廢棄物處理或臨時貯存和廢棄物最終處置）四個階段進行評估，並考慮到各種可能的情况（表 2-3），其中包括大型組的件除役與切割和除役與管理（處置前有的或沒有的處理和貯存）。

每個問題的不同方面或參數都需要進行調查。在安全問題方面，例如，輻射安全風險、工作人員和公眾潛在的劑量、傳統的安全、放射性影響和排放到環境中，都在要解決的議題之中。

一些參數可以定量情況下比較，特別是考慮劑量、成本或影響專案的長短時。然而，往往需要做定性比較。定性的方法，也可以提供確定專案風險的一個重要輸入。要達成目標困難的程度也應考慮。作為第一個步驟，可以進行調查潛在的不可接受的問題。

表 2-2 評估矩陣考慮不同階段/過程的主要議題

議題	階段/過程				結論
	除役	運輸	廢棄物處理/中期 貯存	處置	
	參數				
監管和 申照議題	之前可供參考類似 專案	ADR 廢棄物分類 (LSA, SCO 或更 高)	自由外釋的限值及 程序	需要發展特殊的非 標準包裝申照程 序, 包括準備特別 的安全案例	
	“首先一個樣”的 問題(進程, 容器等)	(IP-1/2) 工業包裝 的可接受度(IP-1/2)	有條件解除管制(回 收) 限值及程序	非標準封裝, 需要制 定專門的驗收標準	
	所有 D&D 專案符合 ALARA	A類和B類容器包裝 執照	處置的處理和調和 過程		
	廢棄物驗收標準和/ 或流程和處置場地 設施的需要改變	監管豁免(如無包 裝, 運輸)	中期貯存執照		
	自由外釋/解除管制 標準可接受度				
結論					
技術及作 業議題	提出概念的成熟和 經過測試的技術可 用性	預期考察次數	評估適用的廢棄物 處理技術/程序(除 污、分割、減量等)	評估處置現場需要 處理大型非標準包 裝所需的修改	
	之前可供參考類似 專案	包裝問題(例如, 外 部屏蔽、減震器等)	需要新的輔助設施	大型非標準包裝, 需 要設計新的專用貯 存隔間。	
	可行性/易於部署	裝卸問題(裝卸方法 的可用性和靈活性)	二次廢棄物最小化	需要開發一種新的 調和過程, 以遷就現 場處置大型非標準 包裝	
	使用原有的電廠系 統和重物裝卸方法	運輸基礎設施需要 的改變	廠內的裝卸問題	需要開發新的大型 非標準包裝的特性	

				調查策略	
	工廠所需改造的次數和範圍				
	一次和二次廢棄物處置策略的影響(例如, 容器類型)				
結論					
安全及合理抑低議題	預期工作人員的外部及內部暴露劑量	符合運輸劑量限值	預期處理過程工作人員劑量	需要重新評估裝卸、調和及處置非標準封裝傳統和輻射風險	
	預期公眾的暴露	運輸安全和廢物恢復性的問題	新的潛在風險/危害(例如化學, 空浮等)	預期裝卸、調和及處置廢物包裝的工作人員劑量	
	廠內的輻射風險(照射、污染等。)	最佳化廢棄物行程(公路、鐵路、海運選項)	因廢棄物裝卸的劑量	有效性評價大型非標準包裝處置場址的效能評估, 包括人為的入侵情境	
	場外放射性風險(不受控制的活度外洩)				
	廠內的傳統風險				
結論					
經濟和時程議題	全部專案時程持續時間(預測)	容器成本	成本效益分析(減少運輸、貯存和處置費用與處理費用)	合部的處置成本, 包括設計、申照、新技術開發和新設施的投資	
	專案總成本(預測)		在處理時發生突發事件的情況下的潛	處置空間的使用	

FOAK 容器的設 事件的情況下的潛

		計、測試和申照成本	在風險時程		
	潛在的時程和成本 內部風險	及時採購容器	中期貯存設施成本	潛在的時程和成本 內部風險（例如，設計和測試延遲、分析的不確定性，等）	
	潛在的時程和成本 外部風險	與運輸有關的突發事件的時程影響（例如，道路堵塞、天氣等）		潛在的時程和成本 外部風險（例如，申照延遲、干涉者行動等）	
		責任、保險的成本			
結論					
公眾接受和利益關係者的議題	公眾認知的專案整體風險	廠外考察的次數和視界	需要向公眾證明中期貯存的需求	公眾參與處置場址再申照（如果需要）	
	透過回收/解除管制最少化廢棄物	避免人口眾多的區域	公眾正面觀感對減少廢物處置		
		運輸路線限制的影響			
結論					

表 2-3 可能出現情境的評估框格

議題	選項/管理模式			結論
	No. 1 廣泛的分割和標準容器	No. 2 單一組件的拆除及廠外處理	No. 3 單一組件的拆除及處置	
監管及申照	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	總結並比較這些議題的三種方法
技術及作業	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	總結並比較這些議題的三種方法
安全及合理抑低	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	總結並比較這些議題的三種方法
經濟和時程	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	總結並比較這些議題的三種方法
公眾接受和利益關係者	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	如果有提到無法接受的議題，就總結的優點和缺點	總結並比較這些議題的三種方法
結論	決定廢棄物管理模式的可行性和優勢	決定廢棄物管理模式的可行性和優勢	決定廢棄物管理模式的可行性和優勢	選擇最適當的選項

如果採用權重的方法用時，結果將是高度依賴於被認定是最重要的選擇標準。因此，建議採取較為中性的態度，並強調選擇標準指向對建議的管理選項。

要在逐案方式建立矩陣，需要整個廢棄物管理過程中的不同行為者的參與：除役組織、運輸者、貯存/處理設施營運者和處置設施營運者。這意味著，為了最佳化，參與這樣的行為者的先決條件為管理大型廢棄組件，應該是除役計劃設計時的就以參與。

事實上，整體最佳化不應被視為廢棄物管理的不同階段中的“局部最佳化”的簡單的巧合。例如，如果在其他階段可抵消危險，藉由對工

作人員在拆卸工作的過程中相當低或更少的劑量或更便宜的成本等，運輸的限制或處置設施中的一個重大空間的使用才可被接受。

因此，這種比較法，應採取透明的方式，首先和最重要的不同角色之間，為了提供一個客觀的整體最佳化；為了證明一個選擇在一個管理步驟中，其他階段對其影響，也應與核照主管機關執行。因此，需要全面檢討，在必要的情況下，並可能涉及當地利益關係者或當地參與計劃的一部分。

2.6 運轉者和監管機關及社會公眾之間的對話

2.6.1 簡介

所有的徐役作業，與利益關係者的對話是一個非常重要的功能。首先，監管機關可能有法定的責任從事超出他們的“社會和道德責任”，提供信息與利益關係者的對話。本節的目的是從監管的角度總結一些法定職責，並附有實例，以及討論一些更廣泛的問題，並且整體而言具體方面有關涉及到拆除的大型組件。

2.6.2 法定責任和國際指導

IAEA 文件 NW-T-2.5（除役的利益關係者參與概述。IAEA，維也納，2009）提供利益關係者參與除役的全面概述及大型組件很好的工作基礎。該文件定義了一個“利益關係者”如下：

由於在一個特定的核相關的作業，真正有興趣者擁有不同意見，目前還沒有提供權威定義利益關係者，也沒有可被各方接受定義。然而，利益關係者通常包括以下內容：監管行業或專業人士、科研機構、政府機關（地方、區域和國家）其責任涵蓋核能是有疑義的，媒體、公眾（個人，社會團體和利益團體）；其他國家（尤其是鄰國，已訂立協議提供

交換訊息，內容有關可能的跨界影響，或參與某些技術或材料的出口或進口）。

OECD/ NEA 利益關係者信任研討會認為利益關係者為”任何參與機構、團體或個人有興趣或社會決策過程中扮演一定角色。根據專案管理的良好實踐指南，利益關係者是“一個人或組織專案中有既得利益 - 無論是正面或負面的”。很顯然，有許多沿著這些路線的變化。

這些引證提供了非常廣泛的定義，因此，它很難給所有的利益關係者和監管互動一個總結。但是，它強調需要與當地社區的互動，特別是在有重大運輸作業，可能伴隨大型組件。這也是由特定國家的基礎設施所決定。

在歐洲，公共或私人專案有可能對環境有重大影響，須經環境影響評估。該法案還要求利益關係者的明確和積極參與決策過程（具體化聯合國的 Århus 公約）。核電廠除役專案，在此監管的範圍內。在這方面，應考慮當作為一個法定的協商，運轉者負有具體責任與某些利益關係者協商。大型組件的特性將取決於除役的範圍是否屬於這些法規所定義。然而，監管的原則，形成了良好的基礎對的本地協商要採用和需要解決的問題這些類型。例如，在英國，通過強制執行的核反應器除役（環境影響評估）規例“（EIADR）。

授權英國核電廠除役的 EIADR 過程，正在進行修改以進行除役專案，其涉及廣泛的利益關係者進行協商作為決策過程的一個組成部分。為了幫助增長和挑戰此過程，涉及了廣泛的積極的利益關係者。所有收到的意見都進行整理、審查，用於支持最終決定。決定發布報告總結了決策過程，具有高度的透明度。

利益關係者被認為是特定除役專案中所有各方手上有既得利益。雖然在英國，EIADR 定義一些法定的諮詢者，這些主要機構相關的法定義務和有關歐洲方針遵循的原則。因此，在歐盟範圍內，有一種可能是考慮大型組件時相關的法定程序。這個過程也包括額外的非法定諮詢，包括一般公眾。其他利害關係人，如當地的社區或壓力團體，也需協商。結合前面提及的 IAEA 指南 NW-T-2.5，提供了一個框架，當可能會進一步考慮大型組件時提供一個很好的做法。

為了讓公眾參與，管理者使用在報紙上的公告信息，提供當地的除役專案持續過程，並隨時可進行公眾諮詢需要的關鍵文件。早在這個過程中，還邀請公眾提出意見直接給監管者，也鼓勵持照者直接與當地社區聯繫，期待建立建設性和互利的關係。

在德國法律規定，第一次除役的任何申請，要求環境影響評估（EIA）。環評規定，該專案應公佈及披露（公眾參與），供公眾查閱。隨後的申請需要個別情況的初步評估，是否有再進行環境影響評估的必要。在許多情況下，經常舉行聽證和討論異議。環評形成一個核子核照程序的組成部分。涉及其管轄的所有機關，應當是核照過程中的一部分。在英國，法定的過程是相似的。

前面的章節提供了一個概述，現場參與的“核監管”的職責。然而，其他監管機關，還有其他的責任，特別是在有關規劃，其中可能有進一步的法定協商。非標準容器的大型組件需要特定的核准。此外，還有可能有與地方當局和整個運輸行程的其他協商要求。

2.6.3 與監管機關互動

拆除大型組件涉及到個反復的決策過程，或有時會一牽涉到一些監管機關的一些權限或授權，如：

- 排放授權；
- 廠內或廠外處置授權或；
- 安全案例的核准；
- ALARA 研究；
- 運輸執照；
- 最佳可用技術的研究；
- 最實用的環保選項的研究，及
- 策略的環境評估。

根據專案的複雜性，交互作用發生在一個顯著的時間內。”執照”也可能是相互關聯或形成重大專案里程碑。作為良好的專案管理的一部分，確保及有關監管機關早參與是不可或缺的。同樣，作為現代社會的一個組成部分，大多數監管機關必須規劃自己的資源，預期如此實行，並促進良好和安全的運作。因此，所有各方的共同目標，使此一過程盡可能高效率。

一些監管機關的青睞的方法，是早期介入。在這種情況下，監管機關要發展監管機關的意見及他正式核准的程度之間的平衡。在一些監管框架，因為監管有具體的責任提供意見，早期介入更容易發展。但是建議並不能代替國家的要求，獲得一個特定的許可或授權。

促進這種對話方法的一個例子是綜合性廢棄物管理策略（IWS），它提供了一個重要途徑，任何廠址上的放射性廢棄物的安全、環境完好和及時的管理。這形成了大型組件的拆解不可分割的部分。他們的做法

有一個概述，持照者應制定並保持當前和今後管理的所有廢棄物的產生或接收其廠址的策略。 IWS 整合和最佳化廠址上的所有廢棄物相關作業，包括運轉作業產生的除役和從管理被污染的土地所產生的廢棄物。

一個的 IWS 應該展示廢棄物在時間和速率得到妥善管理，廢棄物產生需考慮處置的行程路線和設施的可用性。IWS 應制定涉及監管機關和其他利益關係者。應使用適當和一致的品質保證措施，包括對資料和資訊的標準和規範，適當地考慮健康、安全、環境和安全管理系統。此策略應該不會限制所有的物料，目前被持照者視為任何重大浪費：它也應該包括所有在未來可能成為廢棄物的物料。這很可能取決於國家內所涉及監管系統內。有可能是一些不同的監管者涉及到授予許可或授權，可能會引起問題各在個階段之間的定時和分離。不同的監管協商過程的可能性也是一個額外複雜化。

進行策略選擇的研究，以確定的策略能夠確保從運轉到除役的整個生命週期內，盡可能使用一個特定的廢棄物流程（或其部分）廢棄物減量的機會。這些都是早期對話的重點領域。

在大型組件方面，IWS 的方法可以在多個層面。首先，在整體除役計劃的概念層面，並進一步為具體作業和可能選擇決策過程中的一部分，就。在一些規劃觀點，監管准許的形式是理所當然的。通常情況下，已經獲得授權框架內的拆除，在單件除役執照和拆除是不是一個問題，因為它可以防止或減少職業暴露、釋放和風險。然而，有可能會產生的廢棄物量和處置設施可用性的問題相關聯。在這種情況下，方法會有相關，例如最可行的環境選擇研究。有許多例子說明如何開發和使用，及涉及利益關係者如何參與，其中一些是在 IAEA 文件 NW-T-2.5 中引用。

如果不在廠址址完全分割，大型組件的運輸，須逐案審查，通常在特殊安排下，成為沿運輸行程與監管機關和利益關係者參與的一個關鍵領域。

廢棄物處置設施的可用性也是一個關鍵因素，因為他們可能為了 LLW 或 ILW。該設施的許可基於貯儲庫打開時安全狀況的基礎上。這往往對特定的大型組件獨立準備拆除專案。因此，一個特定的授權通常是必需的，從而導致需要與當地的利益關係者進行討論，這通常是由運轉者發起。

由於這樣的授權，可能涉及到不同的監管機關，它們之間需要協調的，尤其是否一個單一的過程的授權或不是為了掩蓋所有有關的各項事宜的問題，如拆卸、運輸和處置。在某些情況下，使用整合的專案團隊或專案委員會已被用於推動監管機關的參與，導致准許。

設施和監管機關的數量增加，與更廣泛的利益關係者群體的溝通變得更加複雜。IAEA 文件 NW-T-2.5 解決一些在不同的國家使用的技術，以及作出的決定。一個主要特點為是否參與正式協商直接影響的決定或選擇的一部分，或者是否包含更多的訊息，通知讓利益關係者群體。

3 拆除技術

3.1 簡介

本章節主要是參考「Dismantling Techniques, Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice, Experience and Know-how, Final Report, June 2009」中的第三章「Dismantling techniques」，這份報告主要是敘述歐洲核設施的除役及除污的相關經驗。

廣義的拆除作業其範圍包括：組件和結構的去污/移除、廢棄物包裝、包裝物運送，及在受管制的掩埋設施中進行處置，但是在規劃拆除作業時，應採用相反的順序進行。也就是先確定廢棄物物流（waste streams）的特性之後，接著就是聯繫未來處置廢棄物的設施，探詢和瞭解廢棄物的接收標準，包括可接受的包裝形式及其內含放射性強度（貝克活度和劑量），包裝尺寸和重量要求，以及相關文書作業。如果廢棄物形式或內容不被該設施所接受，則必須採取替代方案。當包裝尺寸、重量和放射性等限制已決定，就可以確定運輸模式和運送數量（如卡車、鐵路或駁船）。

計劃人員須配合包裝的形式，對於管路、設備和結構等物件，選擇最符合成本效益的切割技術。對於每種可能的技術評估其切割/移除率（噸/天），以決定每天或每週的貨運量，進而設定的總體進度。若有其他技術的經證實可提高產量，則隨時進行調整。

本文將幫助的除役規劃人員針對不同的應用選擇適當的技術。目前的拆除、移除及縮減體積的技術，包括：機械鋸、圓形刀具、研磨切割機、鑽石索鋸、爆炸切割、電漿火炬、氧乙炔火炬、電弧鋸、磨料水刀、液壓

剪。使用液壓挖土機、傳統破壞技術及炸藥爆破，拆除龐大且厚實的混凝土結構。在使用炸藥時，需要有經過認證的爆破專家來確保安全。

以下各節提供混凝土和金屬這兩種主要材料的拆除工法。最後討論使用機械手之拆除作業。

3.2 金屬的熱切割技術

金屬的熱切割技術通常是在不直接接觸工件的情況下進行切割。相對於機械切割是以切刃切斷金屬，而熱切割使用的是介質。這些介質可以聚焦高能量光束（雷射）或高溫火焰（電漿）。大多數熱切割技術的優點是：

- 可在水下或空氣中執行；
- 可用遙控操作，減少工作人員接觸高放射性材料；
- 可延長工作時間，並降低總成本（儘管設備架設和拆卸的時間較長）。

熱切割技術基本分為兩種：一種是讓化學物質在氧氣中燃燒（氧氣切割），另一種則為放電（電漿切割）。熱切割技術有一個共同的特點，他們利用的熱源使材料融化、昇華、燃燒或弱化，最後使大型構件的分離，成為易於掌控的形狀。通常它將結合機械裝置運送金屬塊或熔融物質。此外，根據產生熱量的能源種類，可將這些程序予以細分。這些能源包括：

- 化學方法（氧-燃料切割、金屬粉末輔助之氧-燃料切割、氧氣噴槍）
- 以電流為基礎（電漿切割、氧氣電弧切割、電弧水刀切割、放電加工、接觸電弧金屬切削、接觸電弧金屬研磨、接觸電弧金屬鑽孔）
- 雷射光束（雷射切割，氧氣輔助雷射切割，雷射昇華切削）。

所有的熱切割技術有一個共同缺點，就是會產生固體或氣體廢棄物，包括氣體懸浮物 and 水中懸浮物，可能需要大範圍的過濾和管控。

在下面的章節中，將描述一系列熱切割技術及其性能數據。

3.2.1 化學能源

3.2.1.1 氧-燃料切割

氧-燃料 (oxy-fuel) 切割是使氧和被切割材料之間出現放熱化學反應 (圖 2-1)。因此，這些材料需具有某些特性：

- 它在純氧環境中必須是可燃的；
- 燃點 < 熔點；
- 燃燒溫度 > 金屬融液的熔點 (產生充分燃燒的熱量)；
- 金屬融液之粘度低；
- 有限度的熱傳導係數。

主要是低合金鐵素體鋼 (肥粒鋼) 可滿足上述條件。在這種情況下，切割過程能產生自我保護，由乙炔火焰提供活化能量，而氧氣流動產生的機械能在工件表面形成切縫，進而將氧化產物 (金屬融液) 由切縫中移除。

切割過程中金屬融液輸送熱量，使得鐵素體鋼板 (碳鋼) 的底面是沃斯田鐵 (不銹鋼) 的雙層結構也可被切穿，這樣的結構常用於反應器壓力容器。氧-燃料切割是優良的切割程序，並廣泛應用於拆除作業，曾用在拆除德國核電廠 Gundremmingen Block A。圖 2-1 為氧乙炔切割鋼板，圖 2-2 為氧-燃料切割的噴嘴示意圖。

表 3-1 氧-燃料切割的相關性能參數

操作環境	空氣中或水下
水下深度	乙炔操作可達 10 米，超過 10 米可採用替代燃料
自動/遙控操作	有可能
切割速度	350 ~ 700 mm/min
切割深度	25 ~ 800 mm (標準工具);研究可達 3200 mm
曲線切割	有可能
二次廢棄物	鐵基氧化物 (金屬融液)
耗材	氧及可燃物 (乙炔、汽油、丁烷等)
特點	可用於特定的材料



圖 3-1 氧乙炔切割

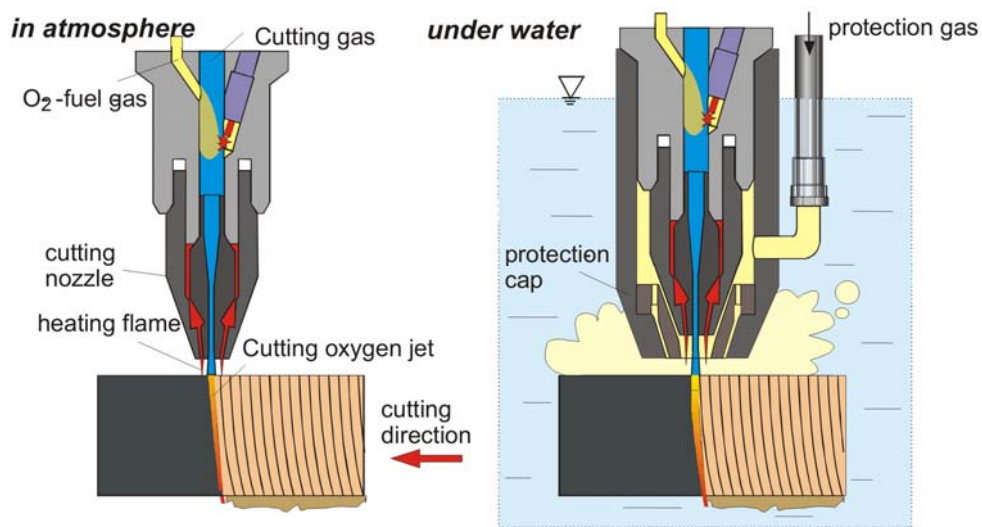


圖 3-2 氧-燃料切割的噴嘴（左）空氣（右）水下

3.2.1.2 金屬粉末輔助之氧-燃料切割

氧-燃料切割被限制用於特定材料，為了能夠切割沃斯田不銹鋼材料、鑄鐵、非鋼合金甚至是混凝土，開發一種金屬粉末輔助之氧-燃料（metal powder assisted oxy-fuel）切割程序加入可燃金屬粉末（通常是細小的鐵粒子，甚至是鎂或鋁），並將其導入氧氣流中，以提供足夠的能量熔化工件，然後從氧氣流產生的切縫中將熔融物移除。

此一技術尚未被廣泛使用，因為它會產生大量的氣體懸浮物和二次廢棄物（外加金屬粉末之氧化物），目前無法提供此一技術相關的性能數據。

3.2.1.3 氧氣噴槍

氧氣噴槍（oxygen lance）或稱吹氧管，是一個充滿了鐵絲或類似材料的圓管。氧氣被引導通過圓管，圓管的一端填入用於連續燃燒的鐵

屑，燃燒產生的溫度約 2500°C 至 3000°C。利用熱工作氣體及液態氧化鐵將熱量傳遞到工件上。所產生的熱量足以熔化多數的材料，包括鋼、鑄鐵、混凝土、玻璃、非鐵合金、有機物和大多數陶瓷。以手帶動噴槍和氣流，將熔融物從切縫中移除。此工具僅適用於鑽孔，但是，經由一系列相鄰的鑽孔，可以達成類似切割的功能。目前並未嘗試將此一程序予以自動化或遙控，因此，在核設施除役的應用僅限於低輻射暴露的區域，傳統上是用於拆除厚牆壁及大型結構物。圖 3-3 為氧氣噴槍切割示意圖及操作照片。

表 3-2 氧氣噴槍切割的相關性能參數

操作環境	空氣中或水下
水下深度	無限制
自動/遙控操作	無；目前僅能手動操作
切割速度	用於低碳鋼的前進速度約 200 mm/min
切割深度	受限於圓管的長度（1500~2000 mm）
曲線切割	有可能（精度較差）
二次廢棄物	鐵基氧化物（金屬融液）
耗材	噴槍、氧
特點	只能打孔、精度低、用途廣

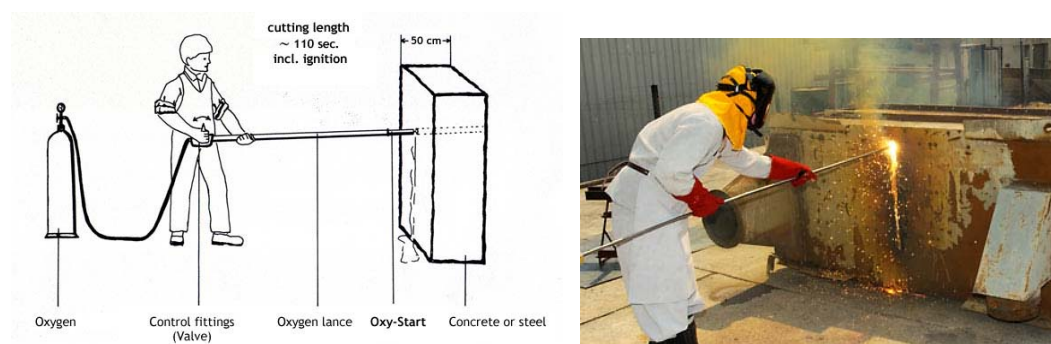


圖 3-3 氧氣噴槍切割

3.2.2 電流相關的切割技術

3.2.2.1 電漿切割

電漿 (plasma) 切割是以壓縮空氣為工作氣體，在電漿火炬與工件之間通過電流，電流持續加熱工作氣體而產生電漿 (圖 3-4)，以高溫高速的電漿流 (電離氣體) 為熱源，將被切割的金屬局部熔化，同時利用高速氣流將已熔化的金屬吹走，形成狹窄切縫進而輸送熔融的材料。電漿切割的優點為：切割速度快、切縫狹窄、切口平整、熱影響區小、工件變形小、操作簡單，而且具有顯著的節能效果。

目前，最先進的鈹金加工技術是使用電漿切割，因為它結合了高切割速度與高精度，材料加工的厚度可達 150mm。因此，它可以被用於除役的各種切削任務中，也可以很容易地進行遙控操作。圖 3-5 為電漿火炬切割鋼板照片。

表 3-3 電漿切割的相關性能參數

操作環境	空氣中或水下
水下深度	目前可達 100 m
自動/遙控操作	可以
切割速度	100 ~ 500 mm/min (10 mm 厚的金屬板)
切割深度	約 150 mm
曲線切割	可以
二次廢棄物	無固體，只有工作氣體 (N ₂ ，惰性氣體)
耗材	工作氣體
特點	精確、快速、材料需導電，切削深度有限

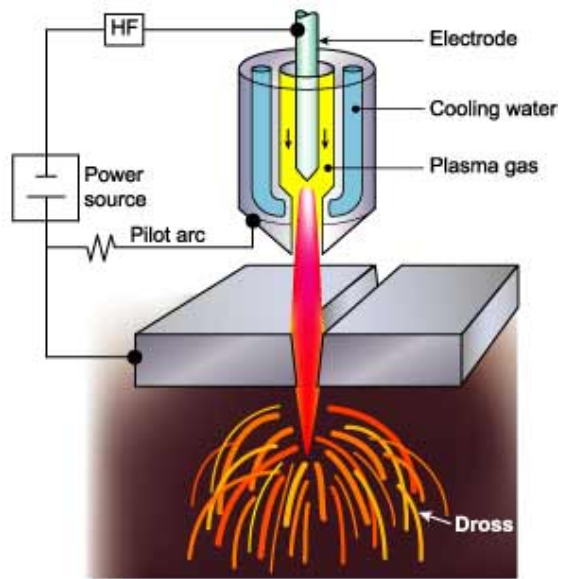


圖 3-4 電漿火炬(plasma torch)



圖 3-5 電漿火炬切割鋼板

3.2.2.2 氧弧切割

氧弧 (oxy-arc) 切割與氧-燃料切割相類似，是使用一個自我消耗的中空電極。在電極和工件之間點燃電漿，藉此將熱傳遞給被切削材料，此外當氧氣被引導通過電極，使得電極（如果選用合適的材料）及工件皆發生燃燒。氧在切削過程中的氧化反應，將增強熱量的產生，也因此有助於金屬融液輸送。雖然此技術與氧-燃料切割相類似，但只適合鑽孔操作模式。

氧弧切割主要是手持操作，用於較小型的切割任務（有限長度及有限深度的切削），最好是浸泡於水中，它被廣泛應用在船塢作業，氧弧切割設備架設如圖 3-6 所示。目前此一技術在除役領域的應用有限。

表 3-4 氧弧切割的相關性能參數

操作環境	最好在水下
水下深度	理論上無限制
自動/遙控操作	不可以
切割速度	100 ~ 500 mm/min (10 mm 厚的金屬板)
切割深度	受限於電極長度，手持設備長約 400mm
曲線切割	可以
二次廢棄物	固體：電極的金屬融液（金屬氧化物）； 工作氣體
耗材	電極、氧
特點	手動操作、精度低、功能多樣、工件需能導電，只能鑽，過程不連續

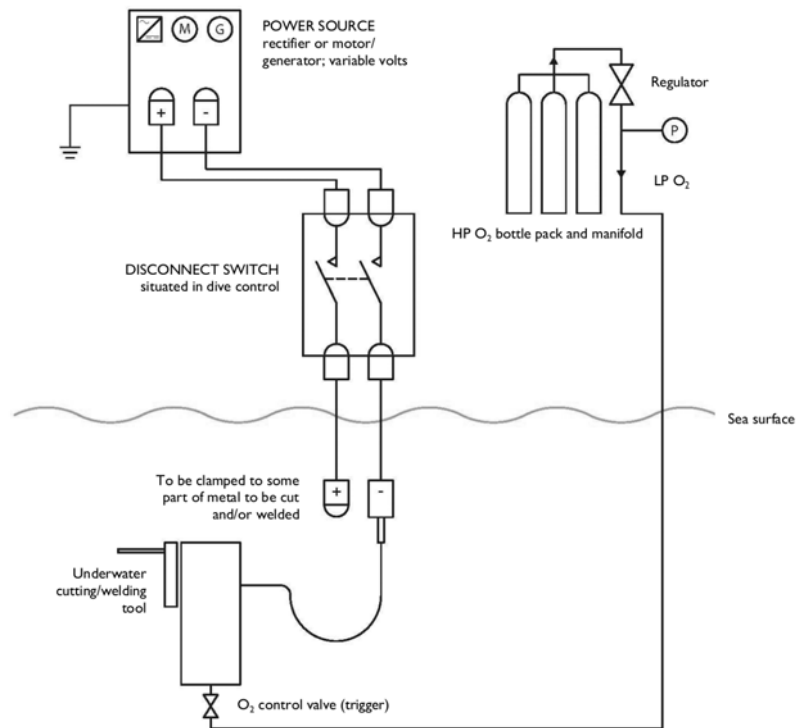


圖 3-6 氧弧切割設備安裝示意圖

3.2.2.3 電弧水刀切割

電弧水刀 (electric arc water jet) 切割在設計及施作上類似於 MIG/MAG 銲接火炬 (圖 3-7)，同樣是使用消耗性的線狀電極提供電能以熔化工件材料。不同的是，電弧水刀使用水的噴嘴，取代 MIG/MAG 銲接的惰性氣體噴嘴，以水移除熔融金屬。到現在為止，此技術只有驗證和應用在 Cadarache (法國) 的拆除工作上。

表 3-5 電弧水刀切割的相關性能參數

操作環境	空氣中或水下
水下深度	理論上無限制
自動/遙控操作	可以
切割速度	2700 mm/min @ 2400 A
切割深度	沒有參考資料
曲線切割	可以
二次廢棄物	固體：電極的金屬融液（金屬氧化物）
耗材	電極、工作用水
特點	適用於中等厚度的工件、工件需能導電、可連續操作

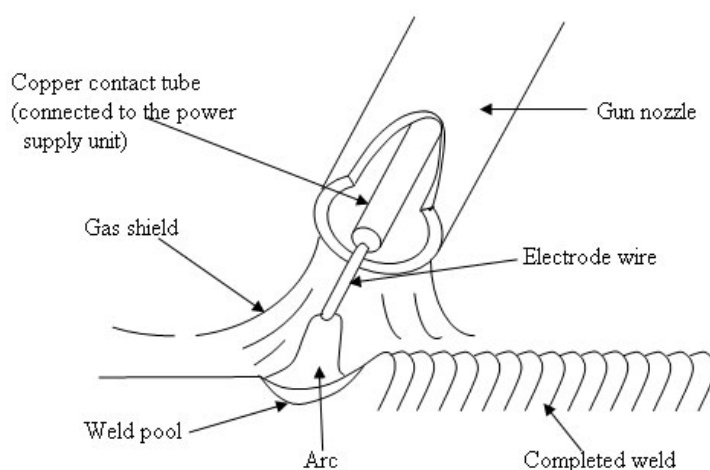


圖 3-7 MIG/ MAG 銲接示意圖

3.2.2.4 放電加工

放電加工（electrical discharge machining, EDM）的過程主要是以脈衝發射出高電壓低電流的火花，火花由電極（通常是銅）射向工件。工件材料被火花熔化或昇華，隨著火花點燃後立即引發氣泡的爆裂，進而對周圍的介質產生衝擊波（圖 3-8）。這種衝擊波將使得切縫中的加工

材料被移除。電極的設計包括銅線（線切割放電加工）或固定電極（下降式放電加工）。

目前，放電加工在切割速度方面受到限制，此技術廣泛的應用於模具工業。它的工作原理是本文接下來敘述的另一個技術的基礎。



圖 3-8 放電加工去除材料示意圖

3.2.2.5 接觸式電弧金屬切割

接觸式電弧金屬切削（contact arc metal cutting, CAMC）是以放電加工的原理為基礎，因為它有石墨電極，可提供切割程序需要的電流。但是，並非經由高電壓點火，而是使用低電壓電漿弧，讓能量得以傳遞。當電極直接接觸工件時，會產生離子弧造成短路。接觸點所造成的高溫，將產生足夠的離子，進而點火啟動切割電弧。

以高速平行水流覆蓋電極，以水流來運送由熔融金屬產生之金屬碎屑，且同時操縱電弧位置，並從電極帶走多餘的熱量，如圖 3-9 所示，沖洗泵浦（rinse pump）驅動水流通過刀具。電極通常設計成短劍形狀（楔形），電極材料選擇石墨或碳纖維強化石墨。該技術已成功應用於德國 Karlsruhe 研究中心的多用途研究用反應器（multi- purpose research

reactor, MZFR) 來拆除的熱屏蔽。圖 3-10 為接觸電弧金屬切削(CAMC)切割鋼管照片。

表 3-6 接觸電弧金屬切割的相關性能參數

操作環境	只有水下
水下深度	理論上無限制
自動/遙控操作	可以
切割速度	約 1500 mm/min (10 mm 中碳鋼板)
切割深度	約 270 mm (依據電極的長度)
曲線切割	不可以；只能直向前進
二次廢棄物	固體：電極的融液 (石墨)；氣體：CO ₂
耗材	電極、工作用水
特點	適用於複雜的中空結構，僅適用於導電材料；切斷狀況易於控制 (不會產生過切)

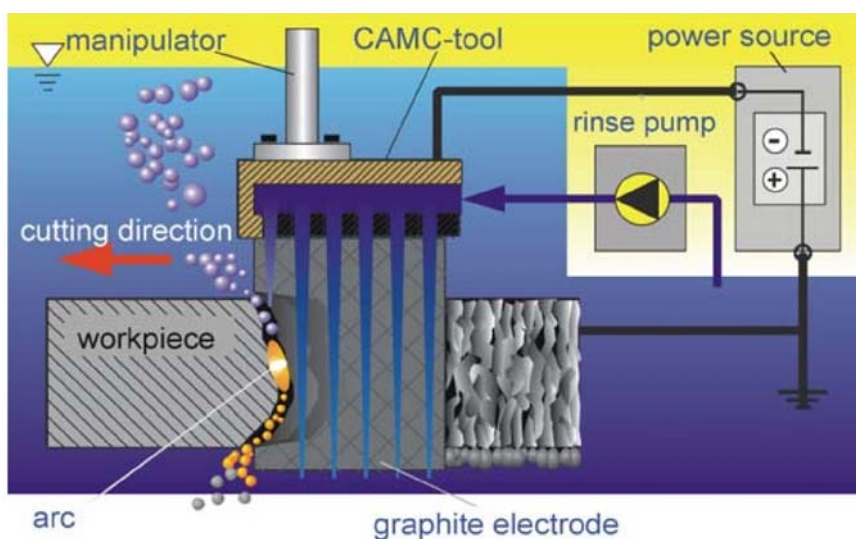


圖 3-9 接觸電弧金屬切削 (CAMC) 工作示意圖

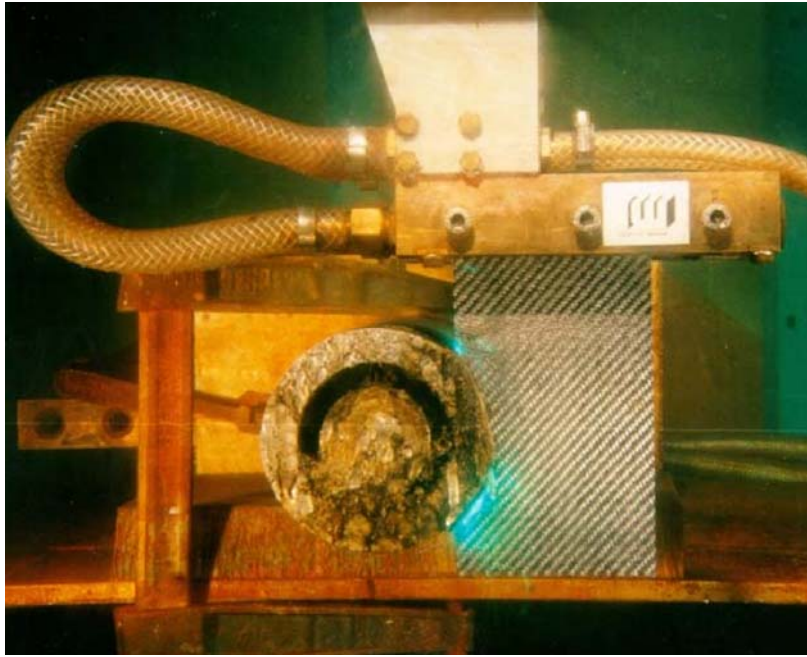


圖 3-10 接觸電弧金屬切削 (CAMC) 切割鋼管

3.2.2.6 接觸式電弧金屬研磨

接觸式電弧金屬研磨 (contact arc metal grinding, CAMG) 類似於 CAMC，使用電極來傳輸必要的電能以執行切割。CAMG 電極 (主要是 Cu/ W 的合金) 為圓盤狀，旋轉速度約 500 至 1500 轉/min，需要有流體流動，以除去旋轉時產生的熔融材料。(圖 3-11) 電極和工件之間接觸造成的短路使電弧點火啟動，具有非常快的切割速度。

表 3-7 接觸電弧金屬研磨的相關性能參數

操作環境	只有水下
水下深度	理論上無限制
自動/遙控操作	可以
切割速度	約 4000 mm/min (10 mm 中碳鋼板)
切割深度	約圓盤直徑的 1/3
曲線切割	不可以；只能直向前進
二次廢棄物	固體：電極的融液
耗材	電極
特點	適用於複雜的中空結構，僅適用於導電材料；切斷狀況易於控制，是所有水下熱切割技術速度最快的

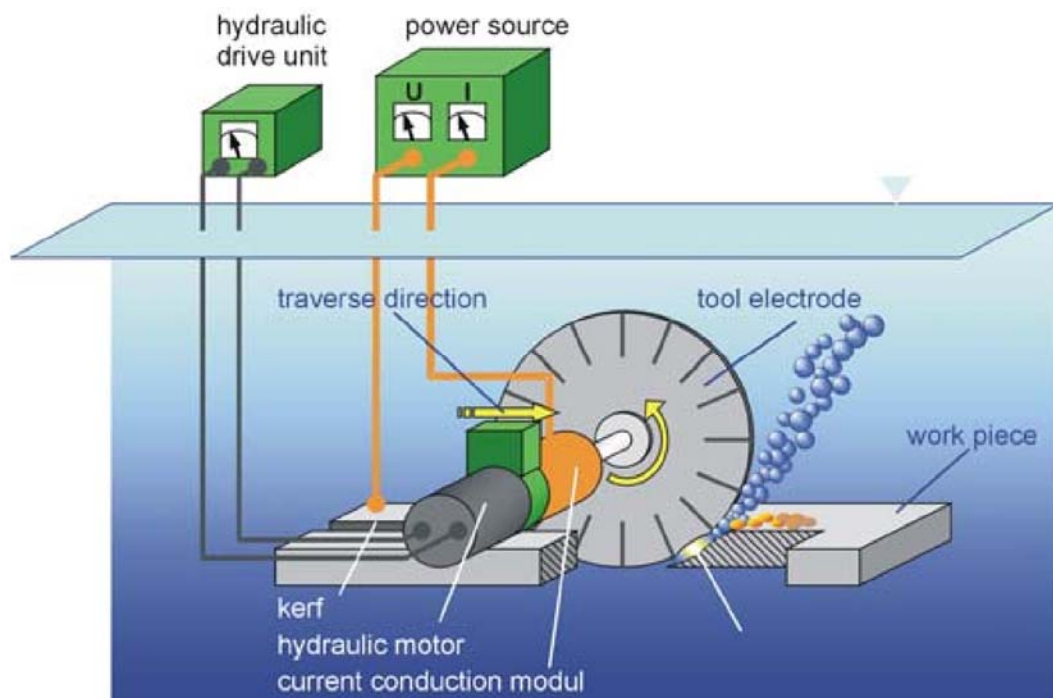


圖 3-11 接觸電弧金屬切削 (CAMG) 工作示意圖

3.2.2.7 接觸式電弧金屬鑽床

接觸式電弧金屬鑽床 (contact arc metal drilling, CAMD) 使用的電極為一中空狀圓筒 (有時未必是圓形斷面)；工件上的接觸範圍就是電極端面。將工作用水引導通過電極的端面，有助於碎屑和熔融材料去除。圖 3-12 為接觸電弧金屬鑽床 (CAMD) 的各部名稱。

表 3-8 接觸電弧金屬鑽床的相關性能參數

操作環境	只有水下
水下深度	理論上無限制
自動/遙控操作	可以
切割速度	約 1000 mm/min (深入中碳鋼)
切割深度	受限於電極設計
曲線切割	不可以
二次廢棄物	固體：電極的融液
耗材	電極；水
特點	適用於複雜的中空結構，僅適用於導電材料；鑽穿狀況易於控制

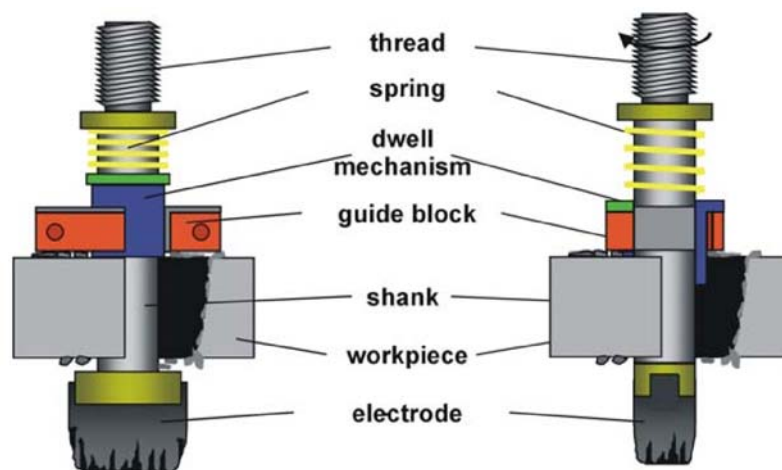


圖 3-12 接觸電弧金屬鑽床 (CAMD)

3.2.3 用於核設施拆除的雷射切割技術

3.2.3.1 簡介

雷射切割鋼板的厚度可達 20 mm，商業用 Nd：YAG 雷射的平均輸出功率為 4 千瓦。目前，工業用雷射的平均輸出功率可提高至 6 千瓦。下面介紹雷射光束工作的程序。

3.2.3.2 雷射切割程序

共有三種基本的切割程序：雷射火焰切割、雷射熔融切割和雷射昇華切割。可依據不同的材料和需求，選擇不同的程序加以應用。

- (1) 雷射火焰切割 (laser flame cutting)：由於使用氧氣為工作用氣體，因此在高速切削過程造成燃燒，燃燒放熱進而產生額外的能量。在燃燒過程中所釋放之能量，將超過雷射光束的輸入能量。材料燃燒成為流體融渣而容易流走。因此，雷射火焰切割設定的氣體壓力將低於雷射熔融切割的氣體壓力。此外，為了保證切割過程的可控制性，必須限制放熱能量。由於燃燒反應使得切割邊緣出現氧化層，此一氧化層與工件之間只有微弱的結合。
- (2) 雷射熔融切割 (laser fusion cutting)：其特點是使用惰性氣體為工作用氣體，例如，氮氣或氬氣。藉著屏蔽氣體的籠罩，防止額外的放熱反應發生。由於該程序只有雷射能量的輸入，因此，切割速度遠低於雷射火焰切割。因為在切割完成後切緣未被氧化，因此沒有必要對工件做進一步的處理。然而，在切割過程中的熔融產物是具有高粘性的，因此，需要非常高的氣體壓力，

以便將熔融體由切縫中排出，從而完成一個乾淨且無尖角之切割。

- (3) 雷射昇華切割 (laser sublimation cutting)：使用高能量密度的雷射，將材料直接從固相轉變為氣相。而這種程序需使用惰性的工作氣體，在切割時可保護材料。隨著處理材料的不同而改變氣體的使用壓力。因為金屬材料的蒸發溫度較高，及受限於可用的能量密度，僅有機材料或塑料材料適用於雷射昇華切割處理，而金屬主要由前述的另兩個雷射切割方法進行處理[6]、[7]。但是，昇華程序卻可以非常有效地應用在除污上，例如，除去表面的薄層。

3.2.3.3 雷射切割應用

比較起熱切割技術：雷射切割的優點是切割缺口較小、切割輪廓精確、熱影響區小、公差小、工件變形有限、無應力處理及高重現性。缺點是需要較昂貴的投資，且雷射的低效率將伴隨著高能耗。與其他熱切割技術相比，雷射切割的產能是最小的[8]。

雷射程序中粒狀物的排放可大量減少。比較雷射程序與電漿程序的公稱衛生空氣需求限值 (Nominal Hygienic Air Requirement Limit Value, NHL)，雷射程序需要較少的新鮮空氣即可滿足容忍值。NHL 值的定義，是指理論上對於已知的排放質量，需要的一定數量的新鮮空氣，使空氣中的各個有害物質不超過允許限制值[9]。

應用於核設施：雷射技術可應用於核電廠拆除的多項領域。有關水下雷射程序的實驗研究，首先是開啟工作氣體，防止入雷射端頭進

水，以保護光學元件。當雷射端頭浸泡在水中，進行水下切削過程時，水取代空氣，可保證雷射光束能自由傳輸而不會受到阻礙。

雷射用於石棉切割可提供了獨特的優勢。使用雷射可以明顯地減少致癌之纖維懸浮物的釋出，因為石棉受熱發生汽化，並在空氣中凝結成無害的球狀顆粒。同時在切割過程，石棉材料的切邊將形成一光滑表層，可使切邊獲得長時間的密閉，有效地防止石棉材料釋出剩餘的纖維 [10]，[11]。

雷射切割使用特殊的程序參數可達到排放最少化，可能會讓熔融材料附著於工件底部形成尖角毛頭，如此可減少排放及污染的釋出。此外，雷射加工技術可應用在管件切割，而由管件的材料及厚度來決定加工程序，在這種情況下，也有可能出現尖角毛頭[12]。

在拆除桶槽或蓄水池時，若其結構為混凝土牆加上內襯鋼板，則鋼材的切割是很困難的。因為金屬板直接覆蓋於混凝土上，以機械方法執行切割是非常困難的。而熱切割法對於鋼板下方的混凝土會產生非常深入的融溶滲透，可能導致混凝土的污染，而需要進一步的處理混凝土。雷射切割對此則有具體的優勢，由於能量的輸入是非常精確的，因此可精準的控制切割深度，就是將切割深度調整成鋼板的厚度，使得混凝土中的融溶滲透最小化。此外，有關塗層鋼板的處理問題，雷射可在幾乎不燃燒塗層的情況下處理鋼板。雷射切割方法的另一個優點是，工作氣體和雷射光束是分離的，使用特殊的噴嘴技術可以將熔融材料驅趕至鋼板的表面上。至於排放過程中氣體的釋放，也有可能以吸氣方式於予以去除[13]。

核設施採用雷射的一個重要原因，是考慮其可移動性和彈性，而實際應用的一種狀況是手持雷射加工頭的可行性。因此，漢諾威雷射中心

(Laser Zentrum Hannover ,LZH) 開發了一項以手牽引教導的設備，進給速率則由系統提供，以確保切割過程的穩定。這種配合核設施的拆除需求所建造的設備，可以不需要導引程式和程序教導，若使用這類機器人，可以顯著的降低成本和節省時間。對於低污染區，由於雷射技術所擁有的優點，相較於其他熱切割技術，可將提供一個有用的替代方法 [14]，[15]，[16]。圖 3-13 為雷射切割頭工作示意圖。

表 3-9 雷射切割的相關性能參數

操作環境	空氣或水下
水下深度	理論上無限制
自動/遙控操作	可以
切割速度	約 1000 mm/min (10 mm 中碳鋼板)
切割深度	在單一聚焦時約 20 mm 單
曲線切割	可以
二次廢棄物	程序用氣體
耗材	程序用氣體
特點	快速和精確；切削深度有限，可應用的材料範圍廣泛

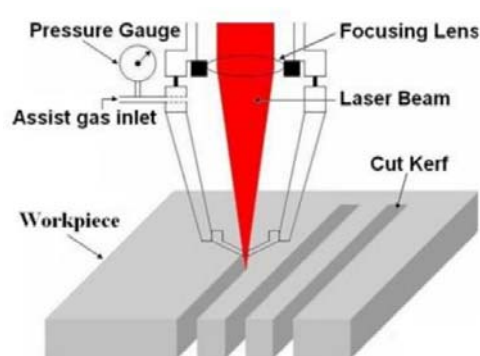


圖 3-13 雷射切割頭工作示意圖

3.3 金屬的機械式切割方法

3.3.1 剪切

依據定義剪切是利用機械力使材料分離 [17]，剪切的種類如下：

- 剪力切割 (shear cutting) ；
- 刃切割 (blade cutting) ；
- 撕裂 (tearing) ；
- 斷裂 (breaking) 。

將液壓剪應用於拆除的案例之一是德國 Würgassen 核電廠，利用這種技術在現場拆除石墨反應器的組件。在德國大約有 900 噸的石墨反應器組件（由石墨或碳石所製作的緩和劑、反射體及熱中子柱等）遲早會面臨除役和/或拆除。拆解石墨組件時，區分出活化/污染與非放射性的部分，可以減少儲存的數量，大幅度地降低處置成本。例如，AVR 反應器原先估計將使用 2511 個 MOSAIK type II 容器裝填石墨組件，因此有可能會減量約 50%[18]。

經過放射性照射，材料的機械性能將受到影響而改變，而石墨零件的變化是會影響拆除計畫。發生在石墨上最著名的輻射效應是維格納能量(Wigner-Energy)，它可以經過短時間的熱處理而很容易地被釋出，雖然它並不被認為是一個有趣科學的議題，但希望經由理論和實際工作經驗中獲得大量有用的資訊。

眾所周知，機械方法處理任何形式的石墨會造成工作場所的粉塵四散。出於安全的原因，石墨核能零件在切割過程產生的灰塵應加以收集。因此，開發合適的過濾技術，來收集切削過程中所散發出的石墨粉塵，過濾技術的應用成為另一項科學目標。在這種情況下，石墨元件選

擇機械式的破碎技術，這是一種廣泛用於消防隊的工具。將刀具的兩臂插入石墨元件的孔洞中，然後，電動液壓泵動作，打開兩臂將石墨破壞（圖 3-14）。圖 3-15 為常見的油壓破壞工具。



圖 3-14 油壓撐開器破壞石墨



圖 3-15 (左) 油壓剪 (右) 油壓撐開器

3.3.2 鋸切

鋸切的定義是使用多齒刀具切割出狹窄的切縫。所有的鋸切都是刀具在移動，並有進料動作相配合。關於工具的磨損和二次廢物的產量，各種鋸切的性能數據間存有一些差異：

鋼絲鋸：

- 切割深度達 100 mm；
- 刀具的磨耗增加量與切割深度超出比例；
- 在大多數應用中，刀具無需冷卻劑和潤滑劑。

弓鋸：

- 同樣適用於薄壁零件；
- 移動的特性使刀具具有高壽命；

- 冷卻劑和潤滑劑增加刀具壽命；
- 切割處理的組件其長度通常為 1 m。

帶鋸：

- 處理較大尺寸者；
- 個別的鋸齒承擔少量負荷，使得刀具使用壽命高；
- 冷卻劑和潤滑劑增加刀具壽命；
- 由於刀具的尺寸窄薄，使得切縫寬度狹小且二次廢棄物量低；
- 在各個的除役專案中（無論是水下或空氣中切割）取得了非常好的效果。

圓盤鋸：

- 金屬切削深度可達 200 mm；
- 混凝土切割深度可達 550 mm；
- 建議使用冷卻劑和潤滑劑；
- 目前的除役專案常使用遙控操作的水下圓盤鋸。

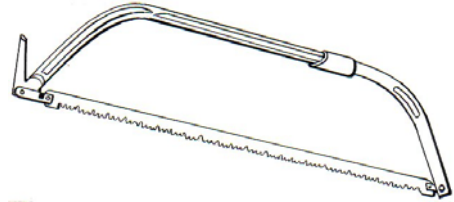
核心鋸/鑽石索鋸：

- 是混合了切割和研磨的切割分離程序；
- 附著於纜線上的切割元件為氮化硼或鑽石；
- 需要使用冷卻劑和潤滑劑；
- 二次廢棄物主要是粉末或泥漿；
- 金屬切削深度可達 300 mm;
- 混凝土切割深度可達 1000 mm.

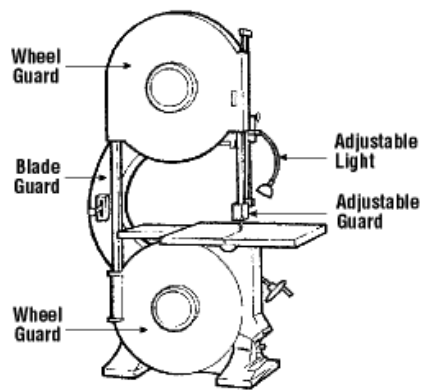
一般來說，鋸切是一個經過驗證的工業技術，它產生的二次廢棄物（碎屑）量少且容易收集，已成功地被應用於世界各地不同的除役專案中。圖 3-16 為常見的鋸切工具。



(1)



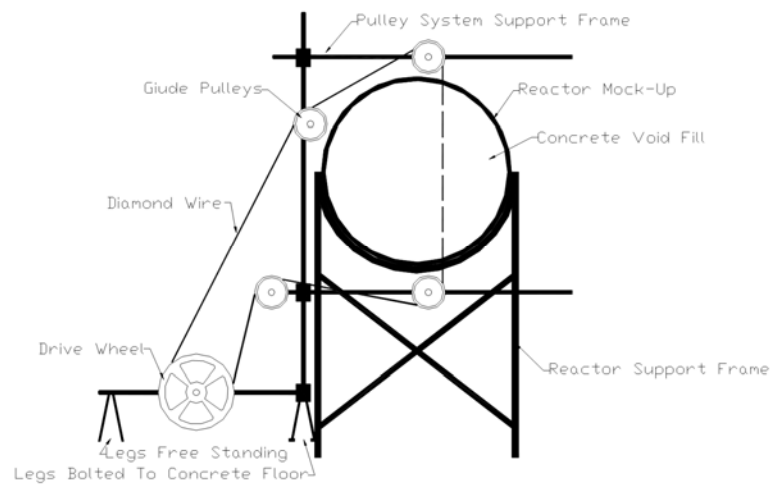
(2)



(3)



(4)



(5)

圖 3-16 (1)鋼絲鋸;(2)弓鋸;(3)帶鋸;(4)圓盤鋸;(5)鑽石索鋸

3.3.3 磨削

在進行研磨切割時，刀具材料也伴隨著工件碎屑一併被去除。刀具使用的材料是：樹脂黏結氧化鋁、碳化矽、氮化硼或鑽石的粉末，並由玻璃纖維加以局部強化。

使用移動性設備可使金屬的切割深度達到 30mm。在切割過程中需要良好的散熱和穩定的工具導引。圖 3-17 為切割用砂輪機照片。



圖 3-17 切割用砂輪機

3.3.4 爆炸切割

爆炸切割是用於金屬或其他材料之一種拆解方法，利用爆炸造成所需的分離，適用於工件幾何形狀屬於特殊設計和特殊尺寸者[19]。爆炸切割器的爆炸核心外有一層金屬外殼，這個外殼是由鉛、鋁、銅、或銀所組成。爆炸切割是利用高爆射流、轟擊產物，和變形的金屬外殼，形成了一個定向衝擊波以切削目標材料。圖 3-18 是以爆炸切割鋼管。

爆炸切割幾乎可用在任何材料，在空氣和水中可拆除的材料厚度可達 6 英寸。此一技術的效果受限於爆炸四周結構物的完整性和污染物擴散的控制能力。大範圍的爆炸切割是昂貴的，主要是因為需要聘請合格的爆炸承包商。受污染組件及系統使用爆炸切割的特殊狀況，如下：

- 切割工作必須同時進行；
- 其他切割技術沒有足夠的使用機會；
- 在高輻射區使用長柄工具進行爆炸切割器的定位。



圖 3-18 爆炸切割鋼管

3.3.53.3.5 軌道切割機

軌道切割機可能是手動式裝置或自走式單元，軌道切割機沿著管件或容器的外部或內部作圓周運動，以執行切斷作業，對於管件和圓形容器切割是一個有效的方法[20]。軌道式切割的工具可分為三種不同類型：

- (1) 鍛刀：這個工具使用硬化滾輪來擠壓和剪切金屬。該技術是能夠切斷薄壁金屬管。

- (2) 車刀：將兩把車刀放置在待切割的管件直徑方向且彼此相對，然後圍繞管件旋轉；每次旋轉後以棘輪機構推動刀具更深入，切割操作的形式與車床相似。這樣的工具可用在小管件及大型圓柱狀容器。該工具可安裝在管件外側進行旋轉，例如 Hanford 的 C 反應器；或在管件內部，例如日本動力示範反應器（Japan Power Demonstration Reactor, JPDR）。
- (3) 銑削刀具：以小型銑刀（例如，狹縫刀）取代旋轉頭上的硬化滾輪（鍛刀），在管件的周圍或內部旋轉而切出狹縫。旋轉頭在每次旋轉後以棘輪將刀具向前推，或由一個專用系統使之連續進刀。

軌道切割機可遠距控制，允許操作員與輻射區域保持一定的工作距離，但它們在剛開始時常需要以手動進行架設定位。圖 3-19 為軌道切割機切斷鋼管之操作照片。圖 3-20 為軌道切割機用於輻射區之操作照片

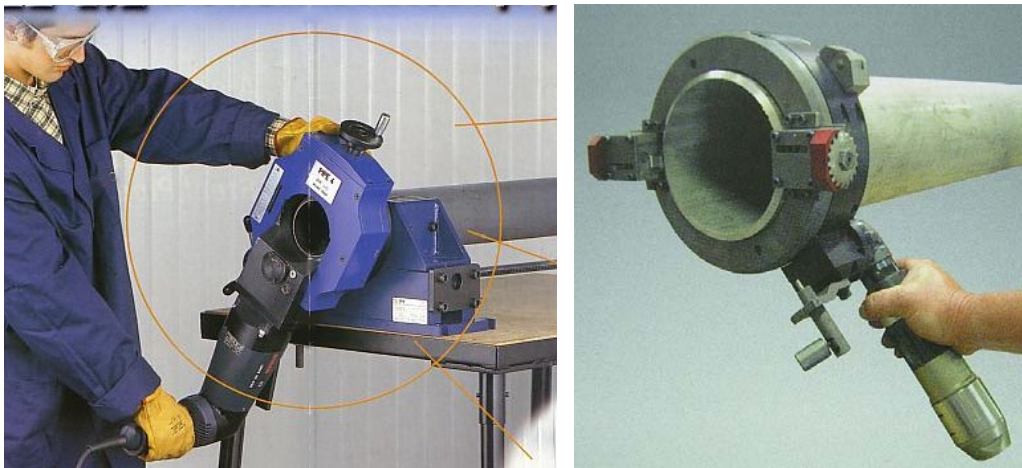


圖 3-19 軌道切割機切斷鋼管



圖 3-20 軌道切割機用於輻射區切斷鋼管

3.3.6 銑削

銑削這種處理程序具有較高的材料去除速率，但它的本意並非是使工件分離拆解，因此用於拆除作業時將耗費較多的時間和工具。銑削程序並不是特別適合於拆除核電廠，通常只適用在特殊的情況下（例如，零件的整修）。

在大多數情況下銑削機具將以固定的方式加以應用。有時也會安裝在可移動設備上使用，例如，傳統的銑削機軌道。

3.3.7 液壓切割技術

水刀技術由於具有大範圍的加載（loading）生成機制而深具發展潛力，可因噴嘴組裝、氣穴現象、電控或超聲波模組的改變，產生由固定加載到變動加載的變化。除了清潔和切割之外，水刀技術還有其他的廣

泛應用。如銑削、車削、鑽孔、破碎、表面改質等，這將應用在許多不同的工業中，如製造、表面處理、醫學、電子、汽車行業、軍事工業及核能應用等。

水刀切割系統由於可靠度的提高，以及水和磨料的自動化系統和回收系統的日益發展，有助於水刀的應用量增加，並加速向不同的領域擴展應用。

柱塞泵(plunger pump)的耐壓程度不斷的提高，與增壓泵(intensifier pump)相比較，柱塞泵通常可連接較高的流量率，使得更多領域可有效加以應用，如造船廠清潔、去除混凝土、核能應用等。

3.3.7.1 用純淨水刀切割和去除塗層

使用增壓泵或柱塞泵對普通水加壓產生水柱。水壓能量經由小噴嘴轉移為動能，依靠加壓和流率可將水加速到 100 m/s。目前用於清潔工作時，增壓泵提供的壓力通常為 400MPa，流率為 4 升/分鐘的。柱塞泵則具有更高的效率，壓力為 350 MPa，而流率可達 20 升/分鐘。

3.3.7.2 磨料水刀切割

普通水柱中添加的磨料以增加工具的效率。目前正在使用的兩種磨料水刀：“夾帶磨料水刀”或稱為“磨料注入水刀”(Abrasive Water Injection Jet, AWIJ)和“磨料懸浮水刀”(Abrasive Water Suspension Jet, AWSJ)，分別採用不同的唧送原理。(圖 3-21)

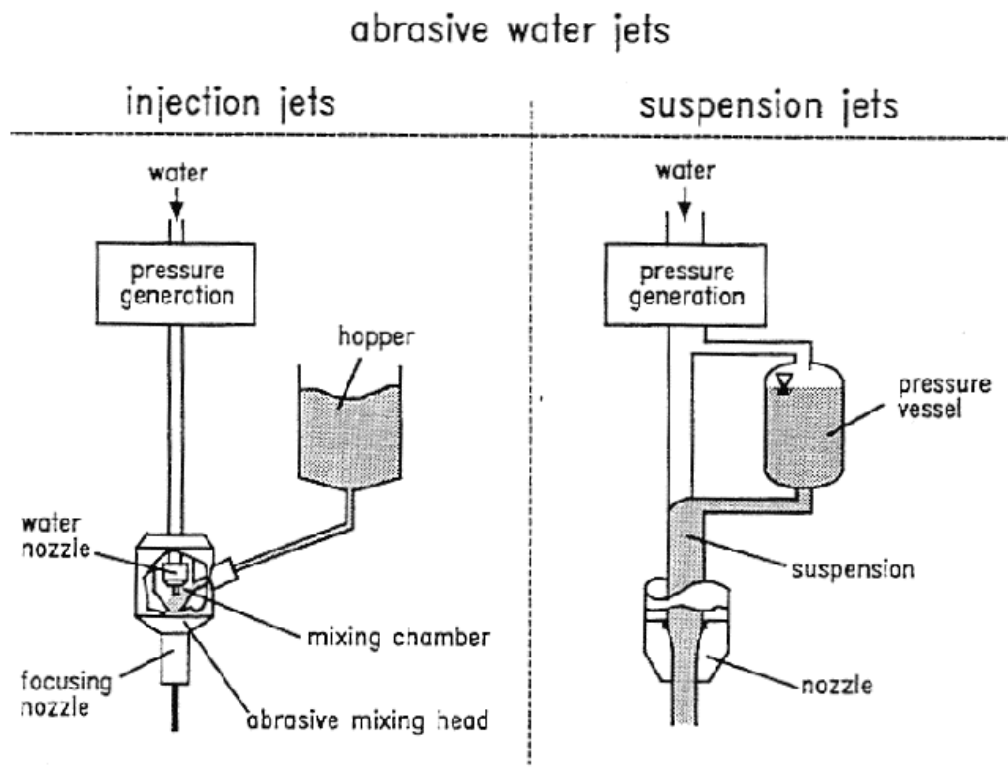


圖 3-21 (左)磨料注入水刀；(右)磨料懸浮水刀

磨料注入水刀 (AWIJ)：磨料注入水刀的想法在 70 年代發展成型。主要的元件是一個混合頭 (mixing head)，它是由一個水噴嘴 (water nozzle) 組件與一個聚集 (focusing) 或混合管 (mixing tube) 所組成。水噴嘴的直徑為 0.2 - 0.5 mm，用於產生一個普通的水射流。此射流穿越混合腔 (mixing chamber) 並產生的真空吸力，磨料顆粒因氣壓作用被吸入腔室中。在混合管中的磨料和水混合、加速和聚集。

磨料懸浮水刀 (AWSJ)：這是磨料水刀的第二種形式，1984 年由英國的 BHR-集團所開發。將高濃縮懸浮液儲存於壓力迴路中的一個容器內。磨料懸浮水刀與磨料注入水刀的主要區別是在缺乏噴射空氣的情況下，由部分的加壓水將高濃度的懸浮液帶入主水流中。懸浮磨料可經

由一段長的高壓軟管運送至切割位置。由於在水射流中沒有空氣存在，使其射流的效率比磨料注入水刀的效率要高得多。磨料懸浮水刀在拆解工業非常著名，只有少數是應用在製造方面。目前最先進的磨料懸浮水刀的壓力高達 200 MPa，而實驗室正在進行 400 MPa 的磨料懸浮水刀開發。

磨料注入水刀與磨料懸浮水刀的特性：這兩種水刀的差異在於他們的產生方式有所不同。磨料注入水刀包括三相（例如空氣的體積約 95%，水的體積約 4%，磨料的體積約 1%），磨料懸浮水刀僅有兩相（水的體積約 80 - 90%，磨料的體積約 10 - 20%）。這使得磨料懸浮水刀中磨料顆粒的加速性更好。因此，在相同的液壓動力和磨料流量下，磨料懸浮水刀其切割效率至少兩倍於磨料注入水刀（見圖 3-22）。但由於磨料注入水刀常用的壓力高達 400 MPa，使得磨料注入水刀在切削深度方面，也能達成類似的表現。

比較磨料注入水刀與磨料懸浮水刀的切割效率：由於磨料懸浮水刀只包括水和研磨材料，比起磨料注入水刀，磨料懸浮水刀的顆粒引導方式更好。這將使得噴射流具有高穩定性，因而改善切割品質和切割效率。磨料注入水刀所生成水射流離開水噴嘴，先通過混合腔再進入聚焦管。因此聚焦管直徑至少是兩倍大（一般為 3 - 4 倍）於水噴嘴直徑。而磨料懸浮水刀的噴嘴直徑相同於所連結的液壓動力管徑，因此產生較窄的切縫寬度和更深的切削深度。與熱切割及傳統方法相比較，水刀技術的優點總結在表 3.10 中。

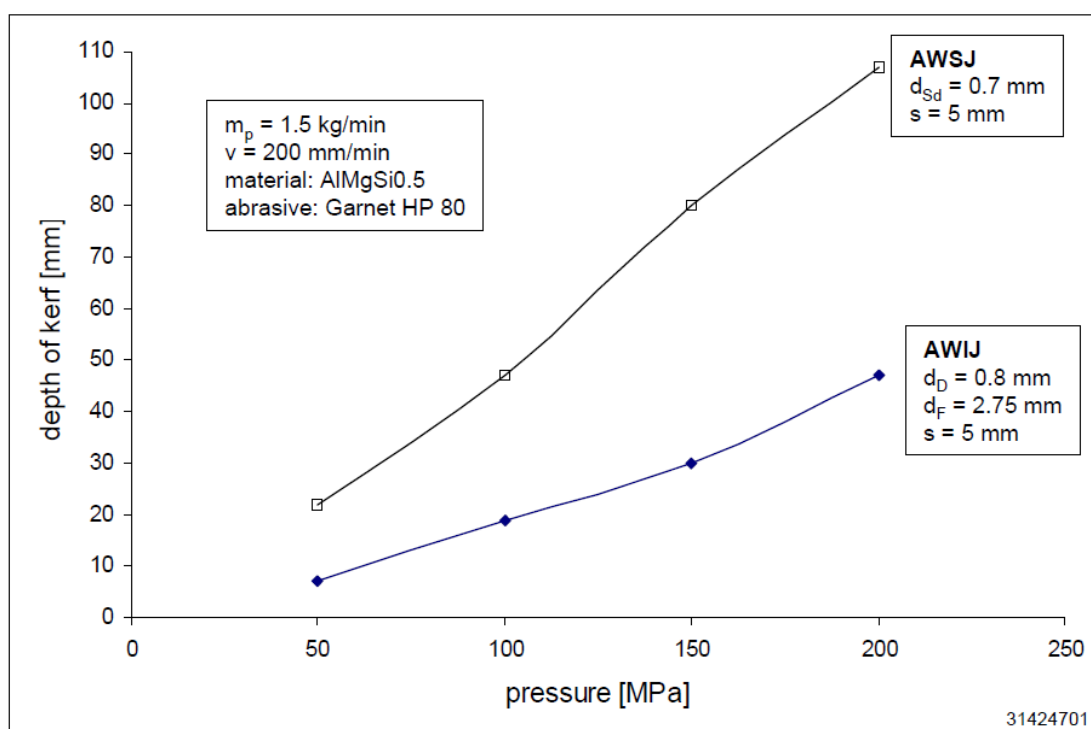
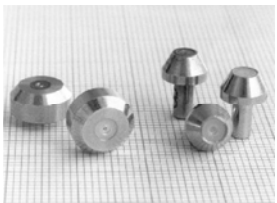

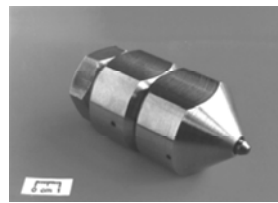


圖 3-22 磨料水刀與磨料懸浮水刀的特性

表 3-10 水刀技術的優點

原則	水刀	磨料注入水刀	磨料懸浮水刀
多功能工具	切割、鑽孔、車削、去塗層、清洗		
無熱程序	無局部反應的產物		
全方位	任何方向角度的噴射均具銳利度		
幾乎可切割 所有材料	“軟”材料	金屬和陶瓷材料	
	均質和非均質材料、複合材料		
切割寬度小	> 0.1 mm	> 0.4 mm	> 0.3 mm
切削深度	PVC- 20 mm	鋼鐵- 120 mm	鋼鐵- 300 mm
小巧靈活的 工具			
應用在不同	在空氣中，在水中，在易燃易爆的環境		

環境		
反作用力低	15 N – 250 N	
與工件間保持距離的靈敏度低	無聚焦的需求	
自然資源	水	水和磨料

3.3.7.3 用於核電廠拆除的磨料水刀

第一個應用磨料水刀的拆除案例，是日本動力示範反應器（Japan Power Demonstration Reactor, JPDR）的生物屏蔽[21]。除了水刀外還使用鑽石索鋸、鑽孔、爆炸等技術，來拆除由鋼筋混凝土組成的生物屏蔽。

由於磨料水刀切割技術的優點，加上新近發展出的其他優點，以這種技術做為除役用替代技術的想法因而產生，進而應用在德國的 VAK 核電廠（位於 Kahl） [22],[23],[24],[25]。應用在 VAK 的兩個研究專案，使用較高的工作壓力，贊助者為德國聯邦教育研究部（Federal Ministry of Education, Science Research and Technology, BMBF）。VAK 專案切除了爐心側板的下半部，這些被活化的材料是在水下切割，依據規劃以磨料懸浮水刀切割反應器壓力容器，並發展出一套策略。切割拆解策略如下：

(1) 貫穿切割：

- 對於整件材料的分離，切割角度應設定為 15°。
- 當物件的其他部分是在封閉環境下進行切割，影響應該是最小，可將切削角提高至 45°，使夾縫的影響降到最低。

(2) 開槽：

- 相對於材料厚度設定一個開槽深度的百分比（例如 95%），目的是防止雜質混入周圍環境中，切割過程中將用過磨料和被加

工材料（具放射性）收集在壓力容器內。最後只有在切割剩餘的一小部分壁厚時，用過磨料和加工材料才會被排出到周圍環境中。

磨料懸浮水刀的首次應用是在Kahl的VAK核電廠。首先以140 MPa的壓力切割爐心側板的下半部和熱屏蔽。反應器壓力容器的切割則使用200 MPa 壓力。在表 3.11 中列出應用的數據。

磨料水刀切割與熱切割相比的優點之一是空氣懸浮物的量少，缺點是產生二次廢物。有關水刀的開槽及貫穿切割應用，無論是在空氣及水中，都經過量化及分析。只有極少量的廢料擴散到空氣成為懸浮物，大部分廢料是顆粒狀沉積物。

在廢料管理方面，安裝一個捕捉器和一個特殊的過濾裝置。在VAK核電廠大部分的研磨材料（97%）直接裝入一個特殊的容器內。經由一個特殊的過濾系統捕捉小顆粒後，水可重複使用[26]。如何盡量減少磨料用量，需要一個最佳化的切削程序及正確的切割策略。

表 3-11 VAK KAHL 的切削參數

	核心側板下半部	熱屏蔽	反應器壓力容器
材料	X 6 Cr Al 13	X 6 Cr Al 13	Austenitic plated, ferritic steel, 19 Mn 5
材料厚度	51 mm (132 mm)	32 mm	104.5 mm (6.5 + 98)
工作壓力	140 MPa	140 MPa	200 MPa
水流量	8 – 20 l/min	8 – 20 l/min	9.5 – 20 l/min
磨料流量	1.3 kg/min	1 kg/min	1 kg/min
切割速度	40 mm/min (13 mm/min)	65 mm/min	25 mm/min
總切割長度	20 m	70 m	63.9 m
磨料的總消耗量	1000 kg		2553 kg

3.4 混凝土結構拆除

拆除混凝土結構（牆壁、地板、天花板和地基）的方法有許多，每個方法在成本、人員暴露和整體效益等各方面，都有不同的優點和缺點 [19]。有一些方法是盡量減少廢料，另一些則是將結構完全地拆除（並不區分成清潔或污染材料）。

每種方法都有其合理的應用方式，在一個特定的情況什麼方式最好，是取決於其特定的環境和最終目標。

3.4.1 選擇性切割

選擇性切割的目是有秩序的移除混凝土，以精確的方式利用更多技術來實現具體目標。這些技術和目標是：

- 分段拆除：逐段去污，在污染移除後允許無條件釋出。
- 指定區域拆除：可能不會有完全被污染大表面，因此，它只需要移除那些受影響的區域。
- 限制污染區附近的拆除：選擇性切割允許有秩序的移除這種結構，避免交叉污染。
- 下面的章節中描述用於切割混凝土的主要技術。

3.4.1.1 火焰切割

火焰切割（flame cutting）混凝土是採用鋁熱反應程序，鐵和鋁的粉末混合物在氧氣射流中被氧化。噴射火焰的溫度（ $\sim 8900^{\circ}\text{C}$ ）導致混凝土迅速分解。所產生的熔融混凝土從切縫中被射流所吹走，可使切縫保持清潔。

火焰也可切割加強棒（鋼筋），因為鐵實際上會強化鋁熱反應。通常情況下，軌道式火焰切割機能切割混凝土深度達 150 cm（有鋼筋或無鋼筋）。火焰切割的主要缺點是產生的大量熱量，煙霧和有毒氣體。

3.4.1.2 熱噴槍

熱噴槍（thermic lance）是一根鐵管，包覆鋼、鋁和鎂等金屬線的混合體，使氧氣通過其中。由管材尖端處的鋁熱反應來達成噴槍的切割，這時所有成分都完全消耗掉。尖端處的溫度範圍從 2200 - 5600°C，視環境因素而定（如空氣或水中）。在切削金屬和拆除混凝土時，噴槍只能在手持模式下操作。

單一的噴槍可以對 0.5~1 m 厚的鋼筋混凝土，燒出一個直徑 5 cm 的孔，費時約 6 分鐘。雖然噴槍適合用於產生孔洞，但具體分割混凝土則需要裂石機。噴槍在空氣產生明顯的煙霧，而在水中產生氣泡。因此，應保持空氣流通，以保護工人和環境。

3.4.1.3 裂石機

液壓驅動的裂石機（rock splitter）將擴張用楔形塊插入一個鑽好的圓孔中以破壞周圍的混凝土。液壓缸產生約 50 MPa 的壓力下將楔形塊插入圓孔中，可以產生 350 噸的拆解力量。在混凝土中的鋼筋則必須以其他方式切割。對於限制進入的區域可以輕鬆地以手持式裂石機來進行分割。單一孔洞的鑽孔和劈裂需要大約 10 分鐘。因為只有少量粉塵產生，污染控制可達最低的要求。

3.4.1.4 鋸切

以馬達驅動鑽石或碳化物合金的鋸片，在混凝土的地板或牆壁切出一道切縫。如果是在呈直角的狀況下切割，鋸片可切斷鋼筋。雖然新技術正在對遙控操作的可能性進行評估，但大多數混凝土鋸是安裝在軌道上以手動操作。正常的切削厚度約是鋸片直徑的 1/3，混凝土是可鋸切的最大厚度約 1 米。鋸切速度可以達到每分鐘 1 m²，視混凝土成分而定。由於大多數混凝土鋸片採用水冷卻以防止翹曲，因此水是一個值得關注的二次廢棄物，另一個值得關注的是空氣污染（粉塵和金屬微粒）。

3.4.1.5 Bristar 拆除化合物

Bristar 是一種用於混凝土拆除的化合物，它是由石灰石、矽質材料、石膏和爐渣混合而成。使用時將化合物與水混合，並灌入混凝土上的預鑽孔，化合物將在 20 小時內硬化及膨脹，產生的力量超過 30 MPa。這股力量導致裂縫發展將沿著預鑽孔所描出的預定斷裂線發展前進。裸露的鋼筋將以其他方法切斷。這個程序不會產生二次廢棄物（鑽孔時除外），有沒有噪音，氣體或空氣中考慮。一個直徑 5 厘米，深 30 厘米的預鑽孔，需要裝填 1 公斤的 Bristar。（圖 3-23）



圖 3-23 Bristar 化合物與裂石範例

3.4.1.6 爆炸切割

在切割金屬及混凝土時，使用爆炸方法的目的，通常是用來使物體形成特別設計的幾何形狀和尺寸，而達成所期望的切割狀況。炸藥核心外圍包覆著鉛、鋁、銅或銀等材料所組成的外殼，爆炸使得相關產物及變形金屬外殼形成高能爆炸噴射，此一衝擊波將切削目標材料。

在空氣中和水下爆炸切割超過 15cm 厚的材料時，執行的承包商必須擁有執照。爆炸切割的使用是有限制性的，因為爆炸可能影響周圍其他建物的結構完整性，或產生無法控制的放射性材料擴散。因此，只有其他切割方法是不實用或使用受限的情況才選用爆炸法。又由於會產生高度的噪聲、煙霧和碎片，因此污染控制是必需的。

3.4.1.7 鑽石索鋸切割

鑽石索鋸（diamond wire）切割最常用來切割巨型的鋼筋混凝土。以車載設備驅動一條鋼索行進，鋼索上分佈有鑲鑽的金屬珠。有關鑽石

索鋸的安裝，對於非常大的組件是以鑽孔方式讓鋼索穿透，如果組件是足夠小，則是以現場接合方式讓鋼索完全包圍組件。鋼索尺寸和長度取決於應用狀況，通常鋼索直徑 1 或 1.5 cm，切削速度為 2~3 m/小時。切割的消耗率是每切割 1 m² 的混凝土會消耗 1m 鑽石索鋸。

鑽石索鋸在切割過程必須以水冷卻，同時冷卻水也可用於沖掉切割碎片。消耗用水將成為二次廢棄物，通常是 10 至 15 升/分鐘。只要定期清除冷卻水和水中的灰塵，即可將空浮降至最低。圖 3-24 為鑽石索鋸設備架設示意圖與鑽石索照片。

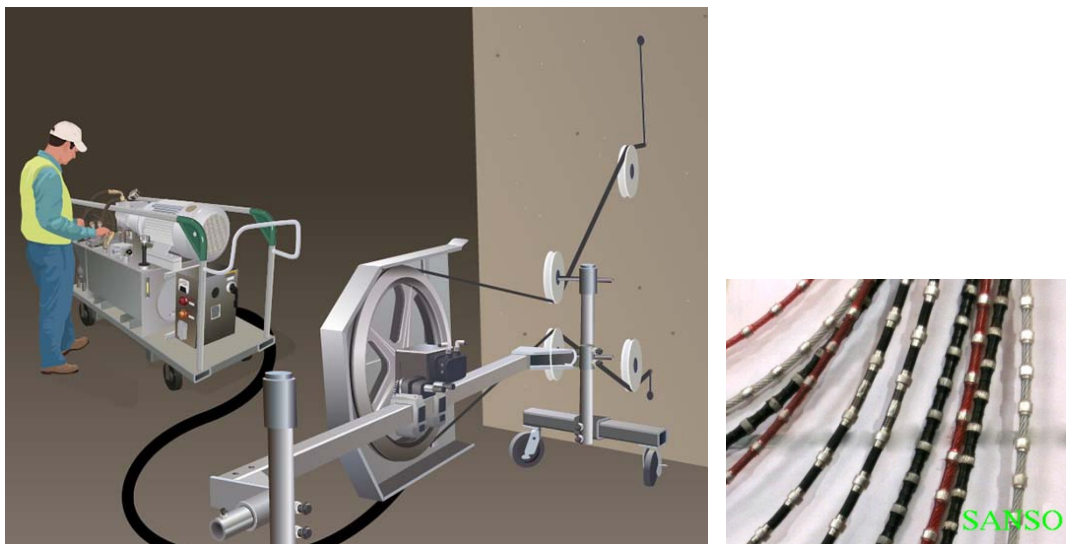


圖 3-24 鑽石索鋸設備架設與鑽石索

3.4.1.8 磨料水刀切割

水刀切割系統是在高速水射流中添加磨料（如石榴石）以切穿大塊的混凝土。最快的切割速度可達 1.5 米/小時，該系統由一個增壓泵、噴

嘴組件及磨料供給系統所組成。噴嘴組件的位置可以遠離供應系統，以便允許遙控操作。系統中的噴嘴在使用 50 小時後，會發生沖蝕而必須更換。主要的廢棄物是水，產生的速率為 5 升/分鐘。不必顧慮空浮污染，但由於水的噴濺及水霧，因此必須考慮交叉污染的問題。

3.4.1.9 其他技術

其他各種切割技術無法使用的關鍵原因，是低效率、範圍狹隘或僅用於特殊任務，在除役的專案範圍內它們被認為是不可行的。這些較慢、較狹隘的技術，包括：

- 路面破碎機 (paving breaker)：通常用於撞擊打破路面；
- 剝削用錘子和鑿子：應用受限制；
- 岩心鑽探 (core stitch drilling)：需要配合另外的技術加以應用，例如岩石劈裂器和鋼筋切割機；
- 動力鋸 (power saws)：通常受限於動力不足及刀片技術不足。

3.4.2 混凝土爆破

混凝土爆破是不分青紅皂白地拆除混凝土，而不考慮將結構保持在可工作的狀態。混凝土爆破通常會產生瓦礫堆，而不利於進一步除污。混凝土結構是否採取爆破拆除，將依據整體結構是否清潔或具有放射性而做出決定。

對於一個清潔的結構物，在完成拆除前的現址調查及釋出後，爆破移除是一個可以接受的方法。這個程序耗時少，比起拆除後再試圖在瓦礫堆中調查放射性，這種處理程序更為簡潔。將整個結構物視為清潔物料加以處置，必須滿足以下原則：

- 整個結構必須是無放射性污染物 –包括所有可擦拭的表面、內面及穿透部位。
- 破壞時不會讓結構受到其他來源的交叉污染，（例如，讓一個乾淨的牆壁崩落在污染的地板上）。
- 來自結構的材料必須保持其清潔，一直到放射性廢棄物區域被移除。
- 決定將結構依污染物進行處置時，應滿足以下條件：
- 該結構是完全（非僅在表面）污染。
- 對於結構被污染的部分，已作出的一切努力來除污。
- 已完成其他選項的評估並且放棄選用（例如，切除受污染的部分）。
- 沒有其他可行的替代方案。

假如對於相鄰的區域並不管制噪音和衝擊的影響，控制性爆破可拆除超過 0.5 米厚的混凝土。控制性爆破用於配置大量鋼筋的混凝土將產生大量的碎片。裸露的鋼筋必須以其他方法切斷（火炬或斷線鉗）。在工作區中嚴重的塵埃必須小心地控制。控制性爆破以最低的成本實現最大的拆除，它也可降低人員的職業暴露。工作人員使用以下預防技術，可確保最低的污染擴散：

- 炸藥用量的多少，在於最大限度地減少石塊拋擲和塵埃生成，且能完成預定任務；
- 運用三元素毯（three-element blanket）。

三元素毯的應用是指：

- 三層密封劑（例如，TURCO5580-G）密封混凝土中的污染物；
- 層狀焦油紙和背膠地毯，吸收爆炸和限制石塊拋擲；

- 覆蓋所有的暴露面，在爆炸周界以外則使用保護材料（例如，Hypolon），以防止污染。

下面是目前常用的控制性爆破的詳細資料：

- 季戊四醇四硝酸鹽（Pentaerythritol Tetranitrate, PETN）：這種炸藥主要的形式是使用爆破引線。它對於暴露面的表面剝落是有效的，去除的厚度非常少（約 20 cm）。
- 高速（85%）膠質硝酸甘油：這種炸藥用於深度 500 到 150 cm 的淺孔。它也可以視需要在選定的孔洞作局部施力，使能量集中在一個特定的區域。雖然有非常好的破壞力，但這種爆炸在孔洞周圍產生大量的灰塵和碎石。
- 鑄裝 TNT（高爆壓引物）：這種爆炸比起常用炸藥，可以最小的隆脹效果得到較高的碎裂。
- 二元能量系統：這種液體炸藥通常是在使用前加以混合，在混合之前並不被認為是炸藥。它可作為 TNT 的替代品，用以剝除表面的污染，若作為成形炸藥可在高密度混凝土上打孔。
- 水膠炸藥：有時會以含有大量鋁的水膠炸藥來取代膠質硝酸甘油。它產生了良好的破壞特性，比其他爆炸物產生較大塊的瓦礫。它主要用於鋼筋很少或根本沒有鋼筋的混凝土，以瓦礫大型化為首要目標。

3.4.3 表面侵蝕/去除

表面的侵蝕/去除技術是以逐漸侵蝕的方式除去混凝土結構，如刮刨或大規模拆卸。特定技術的選用依賴下列幾個因素：

- 目標區的放射性；

- 工作人員的輻射暴露；
- 在拆除過程中經由液體洩漏或空浮行為，釋放放射性顆粒的可能性；
- 混凝土的孔隙度（允許非破壞性清洗的可能性）；
- 要移除的材料的實際體積；
- 混凝土（埋藏和表層）的強化；
- 被移除結構的易接近性。

一般情況下，包圍放射源的塊狀混凝土屏蔽（0.5~5 米厚），其組成使用標準混凝土（密度 2200 至 2400 kg/m³）或高密度混凝土（摻入磁鐵礦或金屬骨料，密度 4000~5000 kg/m³）。某些混凝土屏蔽為滿足抗震設計標準也予以重度強化。先決定移除整個目標或只移除受污染的部分，再決定技術的選用。

有更實用的方法來徹底清除拆解，使混凝土成為瓦礫，在以下各節中描述這些方法。

3.4.3.1 控制性爆破

藉著對於爆炸的實質控制，控制性爆破可拆解混凝土使成為瓦礫，且它會影響物料移動和相鄰結構。當用在厚重、大塊或重質的鋼筋混凝土，是在混凝土上鑽孔並裝入炸藥，孔洞被引爆後，材料被推出結構的自由面，並產生爆炸波。前面曾討論過各類炸藥及其操作方法的特性。

3.4.3.2 破壞球/平板

破壞球通常用於厚度小於 1 米的無鋼筋或輕質鋼筋混凝土結構。2 至 5 噸的球或平板，懸掛在起重機吊臂上，反覆撞擊結構使成為瓦礫。

雖然它是一種有效的拆除技術，但並不建議用於放射性結構，因為結構的內部不易靠近使用，且無法控制粉塵產生或撞擊的反彈。

曾經用過破壞球的除役計畫，是在放射性物質已由設施中移除後。對於設備和操作人員的要求，使這種技術變得昂貴且應用有限。

3.4.3.3 反鏟式挖土機安裝衝擊錘

在反鏟式挖土機的鏟臂上，安裝由空氣或液壓驅動，前面裝有鑿點的衝擊錘。鑿點衝擊錘對於結構表面的撞擊速度約 600 次/分鐘，每次撞擊的能量超過 3000 焦耳，撞擊能量端視衝擊錘頭的大小而定。由於鏟臂本身的長度，可使操作人員遠離被拆毀的結構（6-7.5 米）。因為它的多功能性和相對低廉的租金成本，這種技術被廣泛用於許多除役的工作。對於拆除混凝土結構（小於 0.5 米厚）的整體效益而言，這個技術很有價值，尤其是在移除室內的牆壁及地板方面，但仍須考慮粉塵和噪音污染產生的不良副作用。

反鏟式衝擊錘的移除率，有很大的程度是取決於設備的可近接性、輻射的考量，以及後續清除瓦礫的方法。目前有許多技術使用相同的概念，允許挖土機進行遙控操作，從而減少工作人員暴露。這種遙控操作設備（例如，BROKK）有各種不同的尺寸，也曾應用在一些除役工作上。（圖 3-25）



圖 3-25 遙控的反鏟式衝擊錘

3.4.3.4 牆壁和地板鋸

混凝土的鋸切速度在不同狀況下，存在著極大的差異，這取決於混凝土的厚度和其中鋼筋的數量。當混凝土厚度達 1 米（不超過圓盤鋸片直徑的 1/3），切割速度約 $1 \text{ m}^2/\text{min}$ 。鋸切可採手動或遙控操作，遙控系統的成本將相對增加。混凝土的結構和厚度決定鋸片的更換頻率，並影響整體成本。使用地板和牆壁鋸的原因是：

- 對於周邊的干擾保持在最低限度；
- 只移除受影響區的結構，達成廢棄物最少化；
- 讓小範圍除污可以方便處理；
- 拆除部分結構而得以進入受影響區，避免不必要的破壞；
- 不易靠近的受限區其可接近性得以改善。

通常在鋸切地板和牆壁時以水冷卻鋸片，這些用過的水必須作為放射性廢棄物處理，這種程序產生的塵埃最少。隨著不同的被切割材料，切割過程可能會很緩慢，但這是一種有用的技術。混凝土鋸切是符合成本效益的，但應用受到一定限制。

3.4.3.5 路面破碎機/鑿錘

有時候也可稱為氣動鑿岩機或風鑽，路面破碎機(paving breakers)是以機械的方式，局部破壞表面以移除混凝土。硬化工具鋼製作的錘子以 1600 次 /分鐘的速度，往復撞擊混凝土表面。

“錘子”本身是以壓縮空氣或流體液壓提供動力，每次撞擊的能量為 50~150 焦耳。路面破碎機主要是在重型設備無法進入時，用來移除小面積的混凝土。當混凝土表面的污染向下滲透幾英寸時，也可用路面破碎機來剷除混凝土的表面。使用路面破碎機會產生大量的灰塵和噪音，需要進行環境控制。雖然拆除程序相對緩慢，但使用路面破碎機具有相當的成本效益，並已被證明是有價值的。

鑿錘(chipping hammers)的概念與路面破碎機相似，但重量更輕（7-15 公斤），使得它們適合以手持方式用於牆壁和天花板。撞擊速度通常約 2000 次 /分鐘，但由於破碎面積太小（大小只有指甲的一半），及其重量較重（高達 15 公斤），使它們顯得有些笨重。它們被用來剷除那些可能滲入牆壁幾厘米的小面積污染。除非是在沒有其他選擇的情況下，持續使用它們將有些不切實際。但他們能有效地去除部分被污染的結構表面，且價格合理。

無論是路面破碎機或是鑿錘，並不是為了完整拆除結構所專門設計的，而是作為一種輔助手段，用以消除小區域污染，或其他機具難以到

達區域的污染。在一些除役現場都可以發現各種類型的路面破碎機或鑿錘，它們被認為是除污不可缺少的工具。

3.5 執行拆除技術之經驗回饋

執行拆卸技術獲得的經驗教訓，參考如下[20]:

- 電漿和所有其他熱切割系統往往會散播污染，因此需要有能遏制污染的方法。雖然機械式切割在一開始可能是緩慢的，但經過較長時間後它可能會被證明是更有效的。不同方法擁有的優點和缺點（切割速度，整體速度，二次廢棄物的產生，吸收劑量，成本等），應該會達到平衡。
- 水下切割（對於高度輻射物件）是非常有效的，而且人員吸收劑量並不會明顯地受到工件活度的影響。
- 在適當的地方使用適當的工具，工具的投資成本比起廢棄物和人員成本是微乎其微的，不應該成為選擇工具的主要因素。
- 保養、工具更換和除污的難易程度是選擇工具的重要因素。
- 規劃所需的電源供應，不要忽視支援系統和中央有線網絡。若要能解決突發事件，靈活性是不可缺少的。

3.6 機械手拆除技術

遙控技術是使用在那些劑量率高，且不能讓人員整天在現場工作的區域，或是在拆除作業的環境中存有其他危害，而不允許工作人員出現[20]。

在一般情況下，輪式/履帶式車輛機器人多用於特性調查、除污和拆除任務。其他的發展包括：架於橋樑上之機器平台；電源供應之移動平台；故障恢復設備；自動分離技術；程式化的障礙閃避；程式化的運動；教導

/重現；語音控制；可攜式控制系統；硬體（線控）；雷射通信；力量回饋，以及流量、質量和體積的感測器。目前，這些技術都被視為成熟的技術。

還有其他正在開發及使用的遙控技術，如管道內部爬行機器人；輕、中及重型長距機械臂；超過六自由度的機械臂；遙控/自動的切換；工具與機械臂的介面；力量限制器；多臂協同移動平台的控制；移動/操縱/端效器的複合控制；取樣管理；數據整合/聚集；模糊控制；微波通信；無線電通信；3D 視覺；高清晰度電視；定向音頻；壁厚測量；雷射測距和力量控制。

遙控技術的另一個領域是：精巧的高效能機械臂；多指節端效器（手爪）；單人多車輛控制站；人類與機器人的共生；成像；影像處理；近接探測和定位。

遙控技術可特別用在核電廠發生事故後的除役專案，或用於處理受損的用過燃料，或用於處理各種特定的陳年廢棄物。可以確認的幾項機器人系統，如下：

- 部署系統：部署系統的定義是，可以用來運送工具到達工作現場，並完成工具部署的那些系統，例如機械手、xyz 結構或遙控車輛。部署系統的使用可幫助除役工作進行，以減少人員在輻射和污染環境下的暴露。
- 檢視和偵測設備：這些系統可使操作人員遠距查看工作現場，或收集工作環境的數據和資訊，而無需人力介入。
- 切割和分解設備：在高輻射或高污染的區域執行切割和分解的設備，常常需要進行遠距控制和監視。無論是在空氣中或水中，電子零件和感測器技術在遙控操作領域已經有相當大的進展。

- 除污設備：這裡考慮的除污設備主要是指那些作為端效器，以機械臂或其他運送裝置進行遠距部署的除污設備。相同與前面所述的部署系統，這個領域幾乎不斷的有新進展，且產生大量的研究和開發作業。
- 物料搬運設備：遙控物料搬運設備已經在美國的各項計畫中開發和使用：如橡樹嶺國家實驗室（ORNL）開發的多功能的遙控搬運系統（LANL），及 T-REX 物料系統和搬運系統；愛達荷國家工程實驗室（Idaho National Engineering Laboratory, INEL）開發的自主廢物運送車，和專門用於取出 Fernald K-65 地窖內廢棄物的移動工作系統。

在遙控設備的選用應考慮以下因素：

- 工作規範和任務分析；
- 工作場所的範圍和位置；
- 接近和處置路徑；
- 相關零組件的尺寸和重量；
- 廢棄物產生的種類和數量；
- 環境狀況；
- 可用的服務和輔助系統；
- 維護性和可靠性；
- 故障修復方法；
- 安全和監管要求；
- 成本和進度因素。

執行遙控技術的經驗教訓，可參考以下幾個方面：

- 當其他選項已經完成透徹的分析後，才應考慮使用機器人。強調這一點的目的是要保持除役的單純化。
- 很少有專案需要無線操控或使用複雜的工具。對於大多數工作而言，只有幾個自由度的簡單工具，通常就足夠了。遙控工具需要容易使用、容易適應和強健性。
- 機械手需要有足夠的負載能力，必須是強健的，方可有效應用於除役工作。此外，對於工具的選用，對於反作用力和其他因素能及時應變是一個很好的做法。在滿載操作時，機械手的控制能力往往較差。

圖 3-26 及圖 3-27 是機械手攜帶工具進行切割的照片。圖 3.28 及圖 3.29 是目前發展中的機械手照片。



圖 3-26 機械手攜帶電漿火炬切割鋼板



圖 3-27 機械手攜帶圓盤鋸切割鋼板

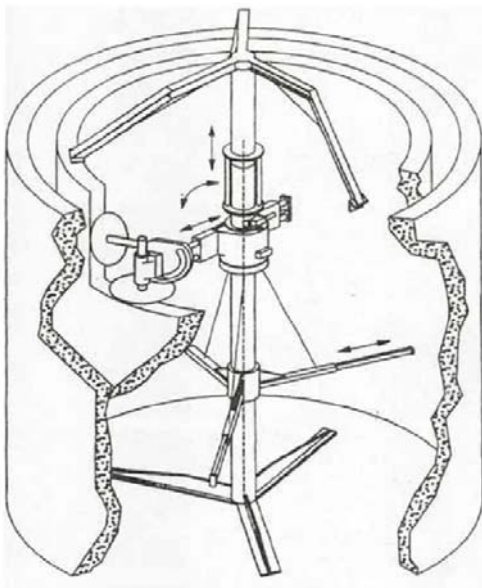


Figure 10.20. Conceptual schematic of arc saw remote manipulation



圖 3-28 用於除役之桅杆式機械手



圖 3-29 雙臂式機械手

4 反應器內部組件切割經驗

4.1 簡介

本章節主要是參考「Decommissioning: Reactor Pressure Vessel Internals Segmentation, EPRI 1003029, 2001.」及「Reactor Internals Segmentation Experience Report: Detailed Experiences 1993—2006, EPRI 1015122, 2007.」兩份研究報告，這兩份報告主要是敘述反應器內部組件切割的相關經驗。

過去十多年來，美國電力研究所(Electric Power Research Institute, EPRI)發佈和出版了一些有關核電廠除役的經驗回饋文件和工作研討會紀錄。這些經驗回饋的文件和研討會，對於未來的反應器設施除役提供了健全的參考準則。本報告主要是整理 EPRI 分別於 2001 年及 2007 年出版的兩份技術報告，該報告內容是敘述 1993~2006 年美國及歐洲在進行除役電廠時，有關於反應器容器內部元件的切割經驗。

2006 年，(除了那些選擇採取安全貯存[SAFSTOR]或是除役日期尚遙遠的電廠)許多反應器設施被要求進行除污與整治，且有很大一部分已完成，預計在近期內這些電廠的除役計畫將作出全整的結論。由於核電廠宣佈或申請執照展延使用，美國在 2020 年之前只有五座反應器將進入除役階段，一直到 2011 年之前都不會出現停機計畫。

核電廠除役將遭遇一系列且不同複雜度的工作。其中有關反應器內部的高放射性零組件的移除和最後封存，無論是在技術、計畫管理和人員劑量等各方面都是重大的挑戰，尤其是壓水式反應器(PWR)。

美國的核廢料依據法規(10 CFR part61 “Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste” Sub-Part 61.55)，對於近地表陸地處置的廢料加以分類，陸地處置的廢料分為：A 類、B 類、C 類和超 C 類(GTCC)。

A 類—廢料含有濃度較低之放射性物質，廢料型態與特性僅需符合最低規定。若此類廢料不夠穩定時，在儲置場中必須與 B 類及 C 類加以隔離。

B 類—廢料含有濃度較高之放射性物質，廢料型態與特性需符合最低規定及穩定規定。

C 類—廢料含有長半衰期且濃度較高之放射性物質，廢料型態與特性需符合最低規定及穩定規定，在儲置場中必須採用深度掩埋或其他障礙加以保護，避免遭受到無心侵入。

所謂超 C 類(GTCC)廢料是指所含放射性物質的濃度超過 C 類廢料，超 C 類廢料不接受近地表處置，它們需放入地質處置場(geologic repository)。

當一座 PWR 核電廠除役時，其反應器壓力槽(RPV)所含放射性物質的總活度，預估約為 500,000 到 2,000,000 居里(Ci)($1.85E16$ 至 $7.4E16$ 貝克[Bq])。而位於南卡羅來納州的 Barnwell 處置場，所接收的單一包件規定不能超過 50,000 Ci ($1.85E15$ Bq)，因此許多反應器內部組件(又稱為爐內組件)將被列為 GTCC，在存入處置場之前，這些內部組件必須加以移除。

值得注意的是，依照美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)的處置規定，為了廢料分類的目的，准許將部分零組件進行平均散佈。若反應器容器及其內部組件之放射性總活度除以(反應器容器)總重量，所得之活性密度低於 NRC 近地表處置的限制規定時，則美國生態公司(U.S. Ecology Inc.)將允許這一個完整的 PWR 反應器容器(包含其內部組件)放入華盛頓州 Richland 的 Hanford 核廢料處置場。而位於俄勒岡州 Portland 附近的 Trojan 電廠，就是依據此一規定將其反應器容器及其內部組件封裝成為單一包件，沿 Columbia 河運送到 Hanford 處置場。

但也只有西北各州聯盟(Northwest Compact)的核設施才允許進入 Richland 的 Hanford 處置場，而此一處置選項並不適用其它電廠的除役計畫。在本報告的 4.4 節將敘述 Trojan 反應器處置計畫的詳細資訊。

圖 4-1 為 Connecticut Yankee(CY)反應器壓力槽及其主要內部組件的剖切圖，這是一個 PWR 反應器壓力槽的典型設計，在爐心筒活性區(Core Barrel Active Region)附近的活性最高。在反應器壓力槽進行處置前，多數情況下會要求先移除壓力槽內的屬於 GTCC 廢料之零組件。

圖 4-2 所示為 Connecticut Yankee 爐心擋板組件(Core Baffle Assembly)的形狀，由於它在運轉時非常接近燃料，因此它幾乎是反應器內部活性最高的組件。

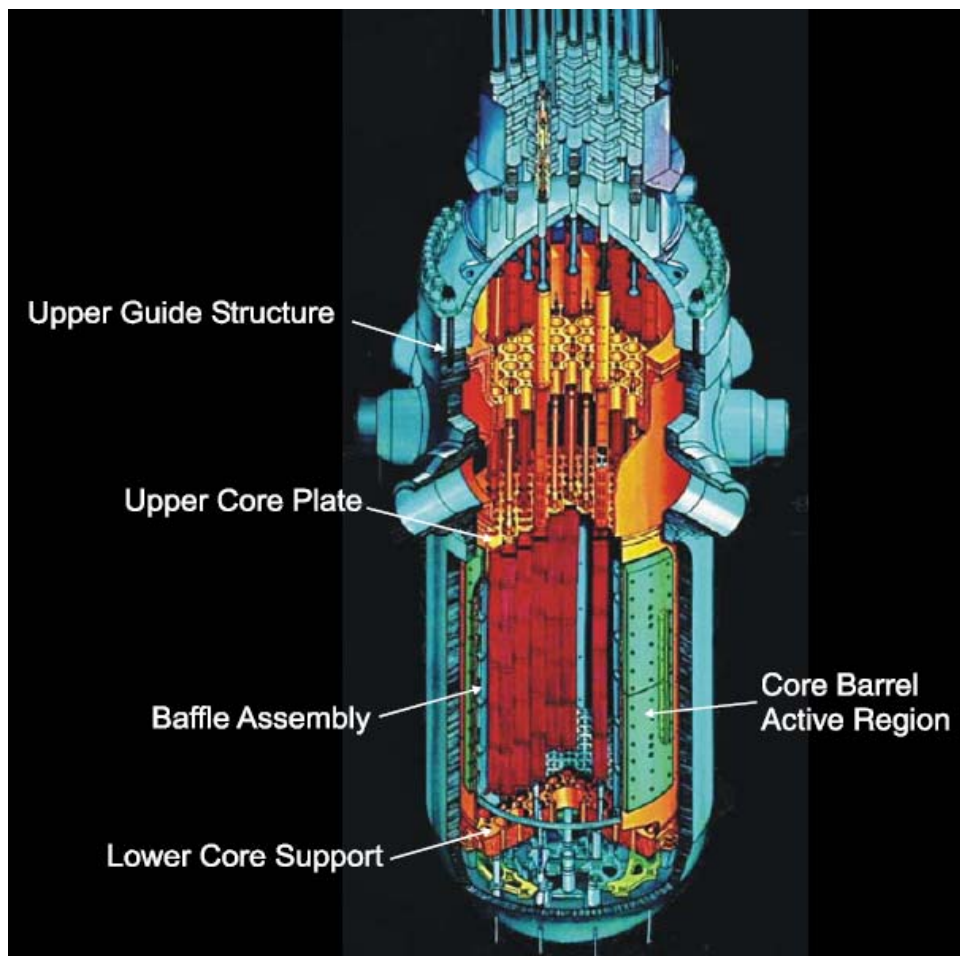


圖 4-1 典型的 PWR 反應器壓力槽

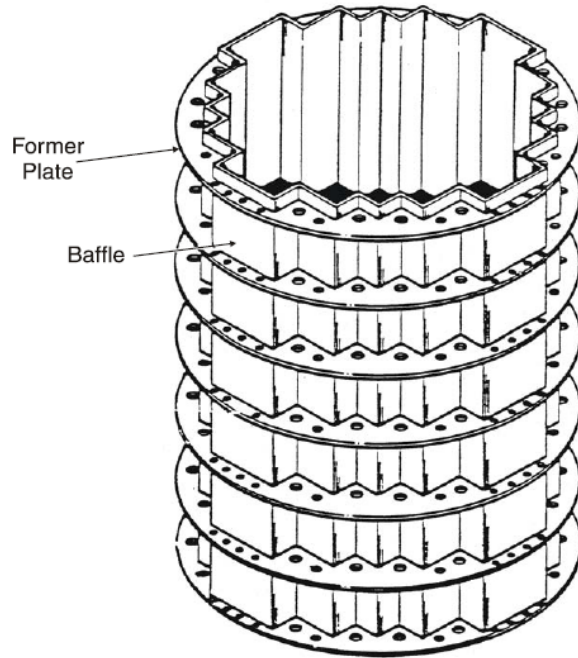


圖 4-2 典型的爐心擋板組件(Core Baffle Assembly)

圖 4-3 的照片顯示 CY 爐心擋板在停機 5 年後，仍發出因輻射所產生的可見光，由此可清楚證明爐心擋板的高活性。

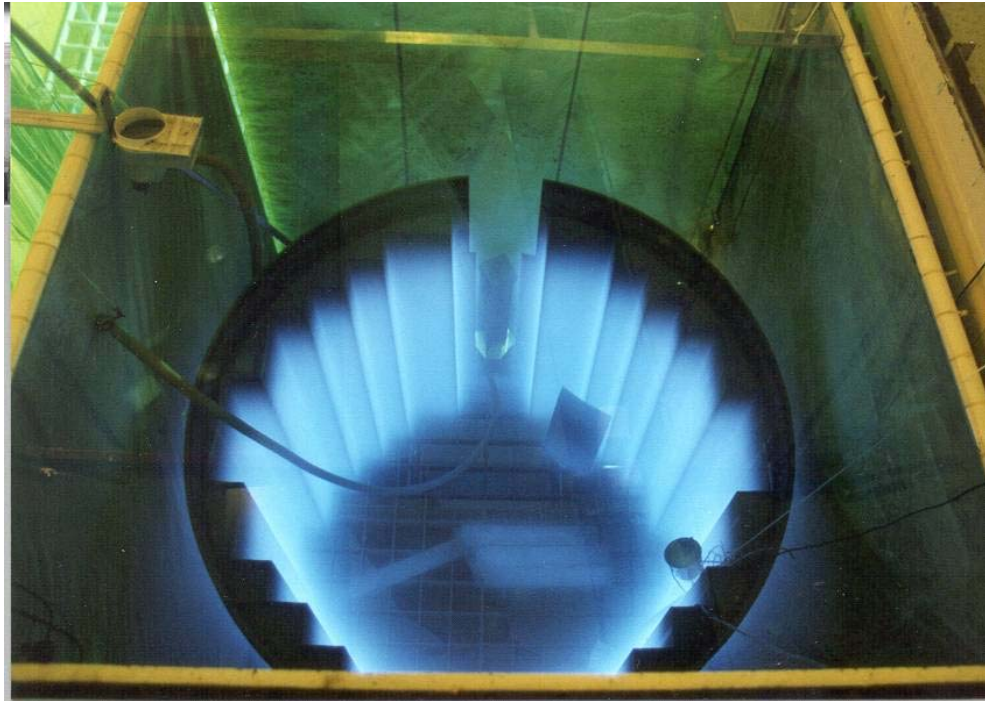


圖 4-3 Connecticut Yankee 爐心擋板組件

移除反應器容器內部屬於 GTCC 的部分，需要：

- (1) 對所有反應器內部組件完成詳細的特性調查。
- (2) 拆除容器中可移動的零組件。
- (3) 切割零組件以移除 GTCC 的部份。
- (4) 移除屬於 GTCC 廢料的內部固定架及平板。
- (5) 當反應器容器及剩餘的內部組件經判定屬於 A、B 和 C 類廢料，則予以重新包裝。

當 RPV 將內部組件移除後所形成的空洞，某些狀況是進行灌漿和最後密封，而成為被核准的運輸包裝，隨後被運送到最終核廢料陸地處置場。

Yankee Rowe, Big Rock Point, Connecticut Yankee, Maine Yankee, San Onofre 和 Rancho Seco 等六座電廠，反應器內部組件的移除是其除役計畫

的一部分。基於計畫結構和技術應用等原因，多個電廠所採用的工法非常相似，但也有些電廠是採用其他替代性的切割工法。經由計畫結構、應用技術和完整的經驗回饋，可從這些電廠的反應器內件組件切割獲得重要的經驗。而經驗回饋能作出貢獻的原因是；各個電廠計畫的先後時序，允許後來的電廠經由廢料尺寸、技術差異，及有經驗承包商的雇用等各方面，來觀察先前電廠的切割策略及經驗。對於這些已完工的反應器內部組件切割專案加以詳細回顧，將可獲得很多的經驗回饋。表 4-1 列出了近期的 RPV 內部切割專案和所採用的主要切割方法。

表 4-1 中只有 Big Rock Point 是沸水式反應器(BWR)，通常 BWR 比較少進行反應器內部組件的切割，原因是 BWR 的總活度遠低於 PWR。Big Rock Point 內部組件切割專案的相關資訊敘述於 4.2.2 節。

這份報告將詳細介紹這些電廠的經驗回饋。不同的電廠將依照專案時間的先後加以介紹，將有助於瞭解這些經驗的演進過程。由於有充足的資訊，且使用統一的格式來描述不同電廠的經驗，而容易加以相互比較。如果某個電廠的某個特定主題有額外的細節，將以單獨的章節來詳細敘述此一主題。

表 4-1 反應器內件組件切割經驗

電廠	功率	專案時間	切割技術
Yankee Rowe	PWR-167MWe	1993	電漿
Big Rock Point	BWR-67MWe	1999	液壓銑削
Connecticut Yankee	PWR-565MWe	2000-2002	磨料水刀，金屬解體加工
Maine Yankee	PWR-810MWe	2001	磨料水刀，液壓銑削
San Onofre 1	PWR-463MWe	2001	磨料水刀，金屬解體加工
Rancho Seco	PWR-913MWe	2005-2006	機械式切割

4.2 反應器內部組件切割經驗

反應器內部組件切割專案的目的，是將反應器內的超 C 類(GTCC)廢料與其它部分加以分離。另一個原因是南卡羅萊納州 Barnwell 的處置場要求單一包件的輻射量需低於 50,000Ci。

4.2.1 Shoreham 電廠

Shoreham 是美國第一座進行除役工作的大型商業核電廠，當其除役計畫實施時，美國核管會(NRC)正在發展除役相關法規，以監督商業核設施的除役，因此 Shoreham 剛好可做為 NRC 發展新政策及新法規的實驗平台。

Shoreham 是一座 848 MWe 的 BWR 電廠，由 Long Island Lighting Company 所建造，在 1985 年至 1987 年短暫的運轉測試，後來因為緊急應變及疏散的議題，依據紐約州政府的協議而停機。整體的輻射物質預估有 602Ci，其中並不包含核燃料、控制棒葉片、及其他已移除的反應器組件等項目。除役計畫之總劑量約 3.2 person-rem，而反應器容器及其內部組件切割約 0.6person-rem。

除役工作主要的承包商有：UEC Catalytic Inc.負責總承包及技術支援，Power Cutting Inc.負責反應器內部組件的切割，E.H. Wachs Co.負責反應器容器之切割與移除，Trentec Inc.負責移除反應器生物屏蔽，Scientific Ecology Group Inc.負責廢棄物減容。

爐內組件以半自動電漿設備進行切割，而反應器壓力容器採用機械式方法切割(除了 lower head 及 reactor vessel nozzles 之外)，將反應器容器切下的外殼放置於旋轉台上，以機械式加工由內部進行切割。除役的全部費用 180.6 million，反應器容器及爐內組件切割費用約 10 million。

雖然 Shoreham 電廠的只有輕微的輻射，但仍有一些經驗及經驗回饋可供其它電廠參考，包括：

- (1) 早在專案實施前，電廠和 NRC 工作人員之間就建立了具有建設性對話機制，針對許多問題及開放性議題加以討論和解決。這使得及早確認問題和潛在問題的範圍，並及早獲得到解決。
- (2) 人員編制的層級對於專案的成本影響非常強烈。將維護的預計完成日期與人員編制層級予以緊密結合，以特定里程碑作為控制成本的手段。
- (3) 對於電廠的系統拆除及元件切割而言，使用經過驗證的方法將比起那些新的或未經測試的方法更有利。
- (4) 對於除役成功的貢獻是甄選有良好記錄的承包商執行關鍵工作，例如 RPV 分割和去除。這類工作的投標規格應仔細準備，以確保那些曾執行非常類似的工作且有成功經驗的公司能成為合格的投標者。

4.2.2 Big Rock Point 電廠

首先介紹本報告中唯一的 BWR 反應器的內部組件切割，相對而言 PWR 切割專案具有較大的規模。

1. 背景

Big Rock Point 電廠是 67MWe 的 BWR，於 1965 至 1997 年間 Consumers Energy 公司負責運轉。該電廠由於規模較小及設計因素，因此反應器及其內部組件的活性較低，在停機後預估約為 6,805Ci(2.5E13Bq)。低活性的原因之一是此類沸水反應器很少使用或不使用不銹鋼。因為該 BWR 的冷卻使用加氫水化學控制，因此允許使用

碳鋼構造。PWR 則是使用硼酸，而允許使用不銹鋼製作反應器內部組件，以及碳鋼反應槽之不銹鋼內襯。但不銹鋼中的鈷(視為雜質)和其他金屬(如鎳)被活化後，使得 PWR 產生高活性。

2. 切割工法

Big Rock Point 反應器內部的切割包括反應器容器的格棒(grid bars)移除。格棒是使用低轉速之水下液壓圓盤鋸(hydraulic mill saw)進行切割。其餘的部分，例如通道組件(channel assemblies)、控制棒驅動葉片、爐內儀器和其它雜項設備等，則是移至用過燃料池，使用多功能的壓碎/剪切機進行切割。

切割專案完成之後，先使用機械式液壓剪將壓力槽噴嘴切斷，再對壓力槽的貫穿管加蓋密封，然後將壓力槽自圍阻體中移出並灌漿充填，最後放入特製的運送箱運往 Barnwell 處置場。

3. 現場經驗

在 Big Rock Point 切割專案中面臨的主要挑戰，是廢料處理過程中，用過燃料池缺乏足夠空間，因為用過燃料池已經被反應器移出的燃料完全填滿。在許多燃料架位置上堆滿了放射性物體，例如控制棒驅動葉片、通道組件、爐內儀器、試片架(coupon racks)和流體噴嘴等，切割這些組件的主要工具是壓碎/剪切機。上述組件大多歸類於 C 類或低於 C 類，因此被允許裝入特殊運送罐送往 Barnwell 處置場。其餘屬於 GTCC 者的組件，則暫存在燃料池中，準備日後放入乾式燃料貯存罐，並存入獨立用過燃料儲存裝置(Independent Spent Fuel Storage Installation, ISFSI)。

4. 經驗回饋

總結 Big Rock Point 的計畫經驗包括：

- (1) 盡可能的減少電廠人員參與切割專案的人數。
- (2) 模擬演練和設備測試被證明是非常有幫助的，尤其是在操作新設備及工作空間受限時。

4.2.3 Yankee Rowe 電廠

1. 背景

Yankee Rowe 電廠的擁有者和經營者是 Yankee Atomic Electric Company，領有深水池 3 型(Dep Pool Reactor-3, DPR-3)的運轉執照，於 1957~1960 年建造，1960 年開始運轉，為西屋公司設計的 4 迴路 PWR 電廠，最終輸出為 185 MWe。反應器內部使用了許多不銹鋼扣件，這些扣件的用途是將各種組件結合在一起，但除了 Yankee Rowe 電廠的爐心擋板(core baffle)為焊接結構外，其他幾座稍晚的西屋電廠如 Connecticut Yankee 和 San Onofre Nuclear Generating Station (SONGS)1 號機，擋板結構的設計則是使用螺栓加以結合。

在 Yankee 電廠使用不銹鋼扣件結合的優點是：在運轉期間可簡化爐內零組件修理過程，當拆除一定數量的水下扣件後，即可將爐心筒的部分結構予以拆解。但缺點是：在 1971 年執行一次特別修復時，需要派遣潛水夫進入反應器爐穴(Reactor Cavity)內完成部分工作。對於如此能量等級的商用核電廠而言，這是第一次使用潛水夫，修復位於爐心筒結構較低處的鬆脫扣件，因此在稍晚的設計中便不再使用扣件設計。

在 1992 年 Yankee Rowe 突然地永久停機，原因是在重新發電之前，Yankee Rowe 必須先向 NRC 證實其反應器容器的長期可接受度(long term acceptability)，此舉使其財務發生危機。反應器容器的鋼板和焊道是否發生無延性溫度(Nil Ductility Temperature, NDT)曲線移動的問題，

曾經迫使該電廠停機，造成此一問題的原因是早期的水流所造成衝擊，使得拉伸試片(charpy and tensile specimen)的安裝架受到破壞，造成反應器容器的可接受度無法明確證明。由於這些試片安裝架已不在原位置或試片不存在，而必須對於無延性溫度的移動做出過度保守的假設。

在 1993 年 Yankee Rowe 決定執行反應器內部組件切割、封裝、裝運及掩埋的部分原因，是南卡羅萊納州 Barnwell 處置場預定在 1994 年 7 月，對非聯盟成員的使用者停止開放(該處置場曾經如期關閉，但隨後又重新開放)，而 Barnwell 處置場卻是 Yankee Rowe 的 B 和 C 類廢料唯一可用的處置場。為了配合 1994 年 7 月 Barnwell 的關閉，決定要移除四個蒸汽發生器、調壓器和反應器(內部組件的大部分已去除)。有關反應器內部屬於超 C 類(GTCC)的部分及爐心擋板，則予以包裝後存放於用過燃料池內，準備日後再進行處置。部分內部組件的處理方式，是隨著反應器容器進行運送和掩埋。由於當時缺乏執照申請的經驗，而考慮核准時間的限制，因此決定將反應器內部予以 100%完全切割。值得注意的是，多數近期執行的切割專案，是將大量的反應器內部組件與反應器一起封裝及運送，以有效地節省切割和運輸的成本和時間。

專案決定將 GTCC 組件予以切除並儲存於容器中，容器的尺寸與用過燃料組件相類似，此類容器的搬運及處置與用過燃料相同。這種方法的缺點是為了裝入這些燃料組件尺寸(fuel assembly sized, FAS)的容器，GTCC 材料需要進行較細緻的切割。

值得注意 Yankee Rowe 電廠反應器內部組件的切割和處置，是第一次有這類商用核電廠使用這種專案計畫。

其間並無核能蒸汽供應系統承包商(nuclear steam system supply, NSSS)、建築工程公司或除役作業承包商(decommissioning operations

contractor, DOC)參與這項工作，而是由 Yankee Rowe 電廠進行規劃並選擇專業承包商執行。

2. 切割規畫

當完成內部組件特性調查工作，並決定內部組件 100%加以切割後，招標規格和委外服務建議書(Reques for Proposal, RFP)的準備工作，都將遵循初步包裝計畫的導引。Yankee Rowe 反應器內部組件的總活性為 915,681 Ci(3.4E16 Bq)，就小型電廠而言，在切割專案剛開始時，此一活性是相對偏高的，原因是電廠停機到計畫啟動只歷經很短的時間，使得被活化的材料不產生明顯的輻射衰減。Yankee Rowe 在計劃切割內部組件之前，並沒有任何承包商曾經執行過類似的計畫。比較有用的經驗是一些熱屏蔽的切割，以及三哩島(Three Mile Island, TMI) 2 號機受損時，一些非常有限的高輻射工作。但依據目前的經驗，Yankee Rowe 擋板的輻射強度仍超過熱屏蔽數十倍。所採用的水下切割技術是電漿弧(plasma arc)、放電加工(electrical discharge machining, EDM)、金屬解體加工(metal disintegration machining, MDM)和一些較傳統的機械鋸切或銑切。由於缺乏有效的經驗，決定先由”較冷”或較低輻射組件開始發展經驗，切割順序是由低活性部份往較高活性部份。雖然在計畫之初，電廠和承包商並不準備執行爐心擋板切割作業，因它具有前所未有的輻射強度。

為此切割專案準備的關鍵文件有：

- (1) 反應器內部組件特性調查(Internals Characterization)
- (2) 封裝計畫(Packaging Plan)
- (3) 招標說明書和委外服務建議書(Bid Specification and RFP)
- (4) 工程設計變更(Engineering Design Change)/10CFR50.59

(5) 切割計畫(Segmentation Plan)

(6) 合理抑低計畫(ALARA Plan)

(7) 計畫執行程序(Project implementing procedures)

在 NRC 尚未批准整個除役計畫之前，電廠使用設計變更程序 (Design Change Process) 來管控此一專案。值得注意，在除役規範改變之前 Yankee Rowe 除役作業已經開始，若在今天，這些作業將會被要求依照管制程序進行。為了這專案發展出一份 25 頁的詳細安全評估(50.59)，且決定併入其他容器的切割行動，如蒸汽發生器、增壓器 (pressurizer lifts)；實施安全載運路線及地板塗層保護，用以防範不太可能發生的切割件掉落事件；制定復原計畫以防範幾乎不可能發生的狀況，那就是在切割關鍵期間因疏忽所造成的爐水流失。

3. 承包商選擇

招標文件準備和承包商選擇，對於切割專案的成功與否是十分重要的。在 Yankee Rowe 的招標文件中，並未指定切割方法，允許投標廠商對於切割方法提出建議。有四家廠商對於計畫的招標表示興趣，但只有三份投標書被接受。其中有兩家廠商的建議是在水下以電漿執行大部分的切割工作。隨著進入現場施作，以及包括所有的計劃、工具設計、工具製作、測試和人員培訓等，競標的固定價格隨之上調。考慮一些關鍵的專案特性，該專案的現場部分採用有明確獎勵和懲罰的時程與材料合約 (Time & Materials, T&M)。此專案最重要的特性是，切割時程須配合 Barnwell 對於 Yankee Rowe 的關閉時程。發包程序需評估承包商的能力、技術方法、經驗和價格。因為現場部分的工作是採取時程與材料合約 (T&M)，所以投標審查小組對標案的評估是基於最低的最終價格，而不是投標的價格。而 Yankee Rowe 的最終價格對於工作團隊的大小及時

程是非常敏感。切割設備的每週支援成本通常會超過承包商的每週現場成本。經過承包商多次提交文件和簡報後，選擇由西屋和 Chem Nuclear 共同支援的 Power Cutting Incorporated (PCI)公司。提案中建議反應器內部組件，大多數採用電漿，少數則採用 MDM 加以切除。

4. 工法及工具測試

合約中要求電廠需完全配合後續的規畫、工具設計及工具測試，這點是絕對恰當的。工具系統的核心是多軸機械臂，機械臂末端攜帶電漿火炬，這個機械臂在原先的燃料吊車軌道上運動，它的設計大量引用承包商在 Shoreham 電廠的經驗。水下的電漿切割工作是在電漿切割工作台(plasma cutting table, PCT)上進行，工作台的設計像一個放置雞蛋的格板箱，此一切割台具有收集浮渣的結構。浮渣是水下切割程序所產生殘留物及熔渣。切割工作台的四周為垂直的側邊鋼板及穀倉式大門，四周結構的範圍延伸超過切割台，在運送零組件的過程中，可提供適當的屏蔽。在切割台下方的鋼結構為倒金字塔狀的漏斗狀容器，較重的切屑將掉入收集容器中，較輕的顆粒則經過吸收口進入浮渣收集系統(dross collection system)。浮渣收集系統屬於切割工作台的一個分包契約。

浮渣收集系統的原始設計是以 Connecticut Yankee 電廠的熱屏蔽的去除/切割專案所採用的系統為基礎，但此一系統在進入現場之前即被 Yankee Atomic 判斷為不適用，所以 Yankee Atomic 增加款項給承包商，來改善此浮渣收集系統。儘管作出了這些努力，該系統仍被證明是非常不合用。

延伸切割工作台的側邊，可涵蓋大多數的電漿切割區域，但不高過爐穴的表面。圖 4-4 是較低(下半部)的內部組件坐落碎片限制結構上，此一結構包括有機械手及其電漿末端效應器(end effector)。切割工作台

捕捉碎屑是依賴重力，但在電漿切割的高能量輸入過程中，會產生水溶膠(hydrosol)和氣溶膠(aerosol)，而水溶膠和氣溶膠將會攜帶一些較輕的碎屑顆粒浮出水面成為浮渣，這些浮渣逃離切割工作台的捕捉，造成工作人員的輻射暴露。事後回顧，當初設計切割工作台時，應使其側邊向上延伸超過水面上，以捕捉較輕的浮渣。在切割工作台上方放置一個集氣罩，用來捕捉較輕的浮渣。集氣罩抽取的氣體將經過高效率空氣過濾器(HEPA)，然後經過主排氣煙囪(primary vent stack, PVS)加以排放，排放的氣體和微粒經由電廠的主排氣煙囪監測系統進行監測。在擋板切割時，集氣罩使爐穴的環境保持在可接受狀況下，但若 HEPA 系統出現故障或堵塞則會發生放射性的空浮問題，這些空浮將造成污染並成為輻射源。機械手控制和水下攝影機輸出都放在燃料吊車上，此種配置使得操作者無法擁有足夠的防護距離，輻射來源是水面浮渣附著於爐穴周邊，形成一整圈所謂的"浴缸環(bathtub ring)"。後來其他的電廠執行切割專案時記取此一教訓，將控制設備放在更遙遠的地點。金屬解體加工(MDM)被用來切除熱屏蔽夾鉗、二次爐心支撐和熱屏蔽螺栓。上述組件的切割是限制在反應器容器的內部，因為在 Yankee Rowe 的設計中，其熱屏蔽是由反應器容器直接支撐，而不是使用爐心筒加以支撐後。

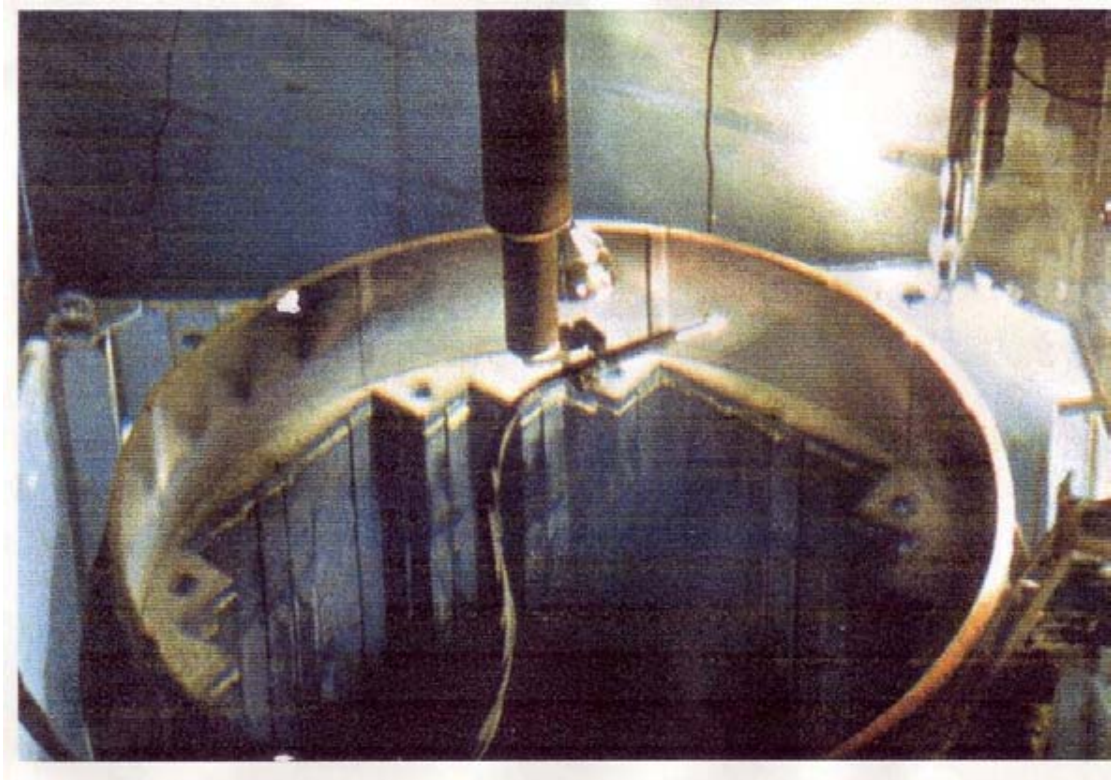


圖 4-4 較低的內部組件座落限制結構上

合約要求所有的工具系統和組件需進行整合測試，回想起來，在此一專案與所有其他電廠的爐內組件切割專案中，這是最重要的部分，也就是針對所有工具和系統進行整合性"高擬真(high fidelity)"測試。所謂"高擬真"測試是對所有的系統和組件進行完整的試驗，試驗中部分反應器內部結構、試驗過程和條件係均使用實物模型(全尺寸模型)，藉以準確描述出真實狀況。儘管專案團隊在工具和系統測試時作了努力，但是浮渣收集系統在測試時仍發覺嚴重的不合用，導致增加額外的清理費用和劑量。由於這項專案的時間緊迫，需在 Barnwell 關閉前完成，因此浮渣收集系統無法及時被納入電漿切割工具，同時在承包商的工廠水槽內進行測試。同樣的，切割工作台的頂部開放式熔渣限制結構也比承包商

測試槽要大，使得熔渣收集系統無法直接驗證。至於機械手、電漿切割設備及 MDM 的聯合作業，在現場部署之前已被充分證明，且在電廠環境中表現良好。簡言之，切割和捕捉大物件並不是問題，但捕捉和處理小顆粒(熔渣)顯然是最大的問題。

結論是，對於那些充滿於反應器爐穴內，且需執行現場切割的輻射組件而言，在進駐現場之前所進行的測試並不夠嚴謹（主要是指隔離結構或切割工作台，以及熔渣收集系統）。

5. 現場經驗

在 1993 年 9 月如期進入現場，雖然在乾爐穴進行的設備組裝過程中遇到一些小問題，但很快的能在現場加以解決。切割專案要求先切割"最冷"或較低活性的部分，最後進行高活性 GTCC 擋板的切割。此種切割順序確實在某種程度上有助於減少劑量暴露。不過，由於不適當的浮渣收集系統及浮渣限制結構(PCT)，在某種程度上，會使得氣體收集系統產成劑量增加的問題。由於爐穴內的可溶性放射性元素逐漸增加，因此欲完成工作需要增加額外的離子交換能力。使用集氣罩捕捉微粒時，HEPA 填滿的速度遠超過預期，因此需要更頻繁地更換過濾器。過濾器的輻射限制為 500 mrem/hr (5 mSv/hr)，以免在更換時造成非常高劑量。

在切割 GTCC 爐心擋板結構時，當完成最初的三刀切割後，爐穴水面的輻射強度達到 1.5 Rem/hr (15 mSv/hr) 的高峰，機械手駕駛台 (Manipulator Bridge) 上則為 150 mrem/hr (1.5 mSv/hr)。因而迫使人員退出圍阻體及進行重組，並重新規劃最後階段的切割。值得注意的是，在切割停止的一分鐘後，較小的粒子將逐漸沉於水面下，爐穴水面的輻射強度將降低到 100 mrem/hr (1 mSv/hr)。在切割後隨即進行爐穴內的水樣採集，活度顯示大約是 $1E-2$ uCi/ml (370Bq/ml)，可知水中不溶性放射性元

素的濃度出乎意料地高。在初期切割並未被發現此一現象，判斷是因為高活性殘渣沉積在切割位置附近的角落所造成。因為機械手駕駛台的輻射強度上升，以鉛毯屏蔽來保護操作者，需要進行駕駛台結構的評估。在之後執行與 Rowe 類似的專案時，其他電廠會讓控制站與爐穴間保持適當的遠距。

6. 運送罐操作及運輸

在 Rowe 的專案中主要是不斷的輪流使用 Chem Nuclear Services Inc. (CNSI) 的 3-55 Class B 和 8-120B 這兩種運送罐。運送全部的輻射物質需要使用十八次 3-55 和九次 8-120 (請注意，在全部運送罐中有一次 3-55 和兩次 8-120，是用來放置切割工具)。在 1993 年 12 月 30 日第一個 3-55 罐離開電廠，於 1994 年 5 月 19 日最後一個 3-55 罐離開電廠。使用七個 8-120 和兩個 15-195 運送罐來運送過濾器和樹脂。為配合 Barnwell 在 1994 年 7 月之前對非聯盟成員關閉的計畫時程，於 1994 年 6 月 13 日最後一個運送罐送抵 Barnwell，完成所有的運送。為滿足計畫時程需求，使用兩個 3-55 罐同時進行運送，在發貨量為兩個的狀況下，平均每週進行一次或一次半(1½)的運送具有最佳運輸效能。

7. 爐穴清理

主要是因為浮渣收集和限制系統的故障，使得爐穴的最後清理非常的費時。爐穴清理造成約 50 person-rem (0.5 person-Sv) 的累積劑量，大約等同於切割專案中完成切割所需的總劑量(直到爐穴開始清理前)。爐穴低點位置的清理是值得注意的問題。該電廠的設計形成一個"護城河區域(moat area)"，也就是中子屏蔽桶的頂端低於爐穴地板。為增加額外的地板空間，用來臨時放置運送罐的內襯，因此以平板覆蓋此一護城河區域。覆蓋平板時需仔細加以密封，可防止渣滓滲漏至平板下，以簡化

這一區域的清理工作。護城河區域的碳鋼表面塗漆是非常不規則的，增加了清理的困難，在進行除污動作時需要非常地靠近輻射源。

8. 經驗回饋

在現場部署的電漿可以切割各種厚度的金屬。水下電漿切割技術經過充分測試後令人滿意。然而，電漿操作中收集和處理小顆粒與氣體的能力，則無法令人滿意，但這卻是爐內組件切割專案成功與否的最大挑戰，尤其是在切割高輻射組件時。

- (1) 設備整合性的"高擬真"測試(特別是對於收集和處理小顆粒的系統)將是**絕對關鍵**。清理系統的測試應納入全尺寸的切割模型。在良好的"高擬真"環境進行工具測試是不可取代的，應盡可能的複製預期中的現場條件以進行測試。
- (2) 由於浮渣收集系統的故障，因此為了保持爐穴內的能見度和輻射強度，需要更換爐穴過濾所用的 Tri-Nuc 過濾單元，最後購買和使用了大約 900 個濾芯(filter cartridges)。這些過濾器從組裝使用、移出、包裝、運送，直到像核廢料般的加以掩埋的種種過程，對於計畫進度、劑量和成本都造成衝擊。數量龐大的過濾器需採用一個獨一無二的水下減容壓縮機，以減少核廢料的體積。
- (3) 清理小顆粒所需的浮渣收集流量太低，不敷使用。原設計是流速為 75 加侖/分鐘(gpm)(284 公升/分鐘[lpm])，若能提升至 1000gpm(3785lpm)或更高，將會更好些。
- (4) 小顆粒需要有更好地隔離限制和點狀切屑浮渣的收集設備。
- (5) 在時程壓力下執行的切割專案具有相當大的風險。此一經驗顯示在未完全準備好之前，專案不應該繼續進行。

- (6) 爐內組件切割是 PWR 進行除役時最具挑戰性的技術任務，尤其是那些運轉歷史中曾產生過很大的功率的反應器。
- (7) 從準備招標說明書開始，一直到反應器爐穴的排水和清理，在專案、工程及人員輻射安全的彼此間，具有高度的關聯性。Rowe 在發包前，ALARA 人員並未實質參與。建議 ALARA 人員需要在工具設計之初，進行評估及提供資訊，以確保這些工具操作可以符合 ALARA 標準。這項工作雖然非常困難，但是除了在工程中稍微修改硬體外，還是可能有些事情可以做的。
- (8) 承包商經驗與選擇是非常重要的，承包商組織的深度也特別重要，因為可以預期的是，這種規模的專案一定會發生現場實作經驗的問題。
- (9) 運送罐承包商應做好包括運輸車輛在內的硬體準備，儘量減少可能的延遲。因為大量運送罐的輸運，如 3-55 和 8-120 運送罐等，需要進行積極的預防性保養計畫，包括拖車改裝和運送罐精拋光。此一專案的運送罐承包商在設備和運輸方面皆有良好的運作。
- (10) 物料裝卸時間遠遠超過切割時間。
- (11) 由於機械手駕駛台和控制站輻射強度的上升，顯示未來對於此類的切割專案，要求其遠端控制站盡可能的設置在更遠處(請注意，在以後的專案確實這樣做)。
- (12) 基於上述經驗，建議應限制電漿應用於較低輻射強度爐內組件的切割。

4.2.4 Connecticut Yankee 電廠

1. 背景

Connecticut Yankee (CY) Haddam Neck 電廠為 New England 電業集團所擁有，供電範圍遍佈於緬因州、新罕布什爾州、佛蒙特州、麻塞諸塞州、康乃迪克州和羅德島。Connecticut Yankee 為單一機組，位於康乃迪克州的 Haddam，佔地 525 畝，為四迴路壓水反應器，額定功率為 1,825MWt 及 619MWe。電廠的組成包括：西屋壓水式反應器(PWR)的核能蒸汽供應系統(NSSS)、渦輪發電機和電氣系統、工業安全設施、核廢料系統、燃料操作系統、儀表和控制系統、必要的輔助設備、電廠廠房結構系統和其他現場設施。反應器容器是由西屋電氣公司設計，由 Combustion Engineering 公司建造，電廠的其他輔助設備(balance of plant)由 Stone & Webster 公司建造(註：balance of plant 是指電站成套以外的輔助設備)。

CY 位於康乃迪克河東岸，大約在 Haddam 東南偏南 21 英里處。1967 年 7 月 24 日 CY 首次到達臨界，1968 年 1 月 1 日開始商業運轉。大約經過 28 年的運作後，在 1996 年 12 月 4 日，CY 永久停機。1996 年 12 月 5 日，Connecticut Yankee Atomic Power Company (CYAPCO)通知核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC)永久停止 CY 的運轉，由反應器壓力槽中移出所有燃料組件，並將他們放入用過燃料池。

2. 切割規畫

在 CY 的除役計劃中需要將反應器容器放入南卡羅萊納州 Barnwell 低放廢料處置場。為了符合 Barnwell 的接收規定，單一包件的輻射量不得超過 50,000Ci (1.85E15Bq)，因此大約有 750,000Ci (2.8E16Bq)的反應器內部組件需要被移除。CY 決定配合 FAS(fuel assembly sized)密封罐

進行 GTCC 材料切割，FAS 密封罐的尺寸類似燃料組件，然後將這些切下來的部分放入 FAS 密封罐中。接著將 FAS 密封罐放入一個運送罐(可容納 26 個 FAS 密封罐)並送入混凝土貯存罐，這些運送罐與 ISFSI 設施中的燃料貯存罐具有相同尺寸，目前 GTCC 材料是無法運往任何一個正在運作的處置場，一般相信，未來美國能源部(DOE)的燃料儲存庫將是存放 GTCC 廢料的最終地點。

在規劃切割程序的安全考量關鍵，是避免在輕忽的狀況下，進行爐穴中高活性組件的移除。此外需注意的是切割過程中污染控制與空浮控制。

在 CY 與除役作業承包商(Decommissioning Operations Contractor, DOC)的統包合約中，有一部分是關於專業承包商的選擇，其中爐內組件切割的專業承包商的選擇，有關細節是屬於機密的。

3. 工法及測試

大部份爐內組件的切割是以磨料水刀(abrasive water jet, AWJ)來進行，研磨介質為石榴石(garnet)。金屬解體加工(MDM)則用來移除較低處的爐心支撐板上的螺栓，以及較高處的爐內組件的螺栓。

大多數的切割工作是在特別設計的切割台上進行，切割台的設計是在更換燃料穴(refueling cavity)中，將切割操作區隔出來。唯一的例外，是在切割爐心支撐筒的上半部分時，由於 CY 更換燃料穴的深度不足，若將爐心支撐筒放置於正常的支撐位置，爐心支撐筒上半部會有 6 英尺(1.8 米)超出水面以上，在此狀況下進行切割，將出現嚴重的人員暴露和空氣污染問題。為了解決這個問題，建構一個特別設計的位置，使用反應器容器的法蘭支撐爐心筒(此時爐心側板仍保持在原處)，如此可使整個爐心筒保持在水下。在此一位置上，超過爐心側板高度的爐心筒將進

行水平切割，再將切下來的部分移往切割台做進一步切割。當爐心筒的上半部完成切除後，剩下的爐心筒和爐心側板被移往切割台進行後續切割。

碎片收集和過濾系統用來捕捉切割碎片和保持水質透明度。在特別設計的切割台上工作可使切割操作與爐穴的其餘部分相隔離。水下過濾系統包括旋流分離器(cyclone separator)、可逆洗過濾器(back flushable filters)、離子交換容器(ion exchanger vessel)及碎片收集容器。圖 4-5 為水下過濾系統。

CY 與 SONGS 1(San Onofre Nuclear Generating Station Unit 1)的爐內組件切割專案所使用的工具基本上相同。關於設備和工法改善這些詳細資訊，將在討論 SONGS 1 設備時再詳加說明。

在現場部署前的爐內組件切割設備測試，為一個"有限度"的整合測試，這是因為只有一個相對較小的淺水池可供使用，因此所有的切割設備無法同時進行測試。經驗顯示一個完整及全尺寸的測試，對於內部組件切割專案的成功與否是很重要的，這些將會在後面討論到。

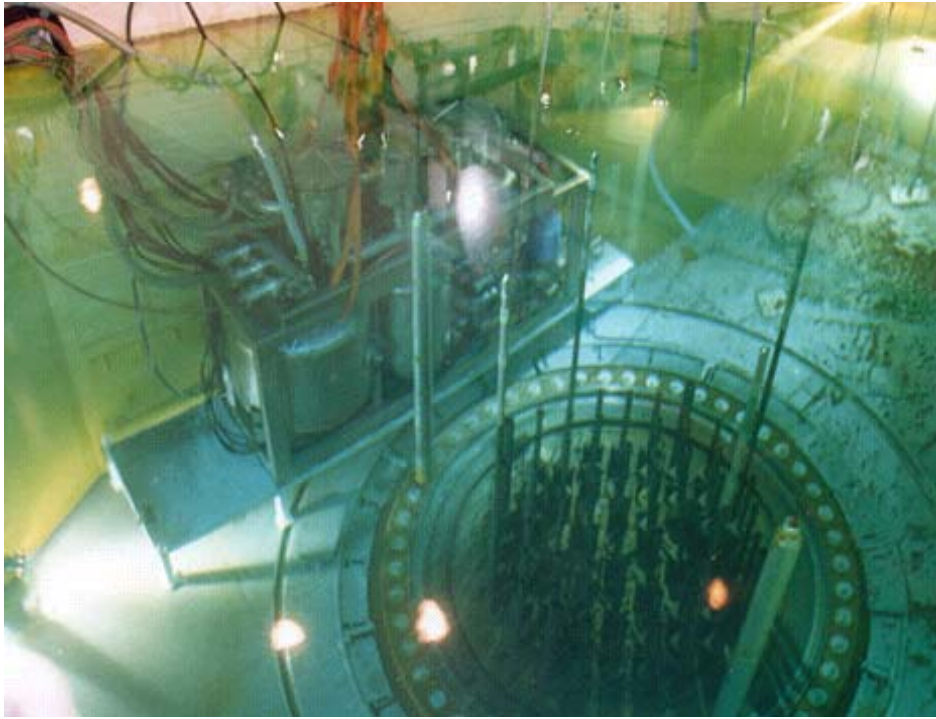


圖 4-5 CY 水下過濾系統

4. 現場經驗

Connecticut Yankee 反應器的內部組件切割被證實是一個極具挑戰性的計畫，完成整個計畫大約花了 29 個月，總輻射暴露約 205 person-rem (2.05 person-Sv)，工作時間和劑量皆超過原先的估計。專案實施期間，因為重大的輻射暴露、時程延宕和成本支出所造成的問題，將探討其部分細節。

最嚴重的問題發生在切割組件用的磨料水刀設備，以及計畫執行過程所使用的過濾設備。

以下是切割專案的一些關鍵統計數據：

- (1) 金屬切割的直線長度為 1800 英尺(550 米)
- (2) 產生 600 個切割件分別被裝入 64 個 FAS 罐

- (3) FAS 罐裝入 3 個垂直混凝土護箱(VCCs)，並移往 ISFSI
- (4) 產生約 650 立方英尺(18.4m³)的切割碎片(送往 Barnwell 處置)
- (5) 產生 600 立方英尺(17m³)過濾器 and 樹脂的廢料(送往 Barnwell 處置)

雖然磨料水刀這項切削技術曾應用在其它設施，但此項設備在 Connecticut Yankee 的應用並不完全成功。造成故障及延誤的原因有：

- (1) 供應磨料和輸送切割碎屑之軟管發生堵塞
- (2) 由於切割主軸的剛性不足，在整段切割或適當尺寸切割時發生失誤，因而需要重新切割，或是金屬切割件的尺寸與原先規畫的不同，使得這些切割件在放入 FAS 罐時產生困難
- (3) 磨料水刀末端控制的重複性不佳，使得切屑(swarf)中出現金屬薄片。(切屑是指水下切割過程產生的殘留物及渣屑)
- (4) 最初選用的磨料尺寸並不是最佳的
- (5) 切割噴嘴更換頻繁
- (6) 上述因素導致切割花費更長的時間，並產生大量的碎片(磨料/金屬屑片)需要處理及清除
- (7) 拆解工作執行包括金屬解體加工(MDM)的使用規畫。
- (8) 過濾系統用於收集切割生成的碎片，並保持水質透明度。所遇到的問題包括：
 - (9) 系統捕捉速度和擺放位置不當，無法跟上碎片的產生速度
 - (10) 過濾器套件(filtration skid)管路的堵塞，進一步使得過濾能力和系統運作效率的降低
 - (11) 過濾器套件放置在水下，雖可減少人員在操作過程的劑量，但設備的維護與更換變得非常困難。例如設備中泵浦組件的設

計，並不允許進行遠端更換，維修時需將過濾器套件升高至池面上，這將造成人員的高暴露

(12)上述狀況使得系統流速降低，造成軟管阻塞，更進一步使計畫延宕，且無數軟管被遺棄在水池中，造成日後清理時間的延長

(13)缺乏效率的過濾系統導致爐穴內水質清晰度不佳，且材料沈積在切割阻擋遮幕和爐穴牆面上，使得輻射劑量增加

當原本的設備無法有效的運作時，需加入額外的過濾能力。這些額外的過濾設備可收集爐穴內外的切割碎片及維護池水清晰。這個新的設備包括一些經過驗證、模組化、可移動之過濾器，以及那些裝填介質之容器。

在 CY 爐內組件切割專案的執行期間，採取許多減少暴露的措施。這些措施包括：

- (1) 在駕駛台上增加屏蔽
- (2) 頻繁地使用高壓清洗
- (3) 增加組件的屏蔽
- (4) 建立一個低劑量的等候區

計畫中使用了一台稱為"Grant Machine"的遙控機械臂，此機械臂原本是用於切碎和打包環繞在反應器腰部的熱鏡絕熱層(mirror insulation)。此一機械臂就切割及移除設備而言，可攜帶軟管執行沖洗爐穴和吸取切割碎片等工作，被證明是非常有用的。此外，機械手也可攜帶水刀噴嘴(hydrolazer 是水刀的另一名稱)，在爐穴洩水之前去除爐壁上的塗層和污染。這個機械臂所具有的高度效率，可有效的減少輻射暴露、工作時間和成本。Grant Machine 機械手亦可減少物料搬運的問題，例如，將掉落的切割件(有一些物件可能會在某個位置被卡住)及不

易擺放之切割件放入 FAS 罐中。圖 4-6 和 4-7 顯示在 Connecticut Yankee 使用的 Grant Machine 的狀況。

CY 內部組件切割專案於 2002 年完成。內部組件在切割後，部份將放入反應器壓力槽內，圖 4-8 所示是送往處置時的最終結構。2003 年將反應器壓力槽予以灌漿處理後，放入一個特別設計且僅能使用一次的運輸包件中，運往 Barnwell 處置場。



圖 4-6 Grant Machine 組裝結構



圖 4-7 Grant Machine 清理爐穴

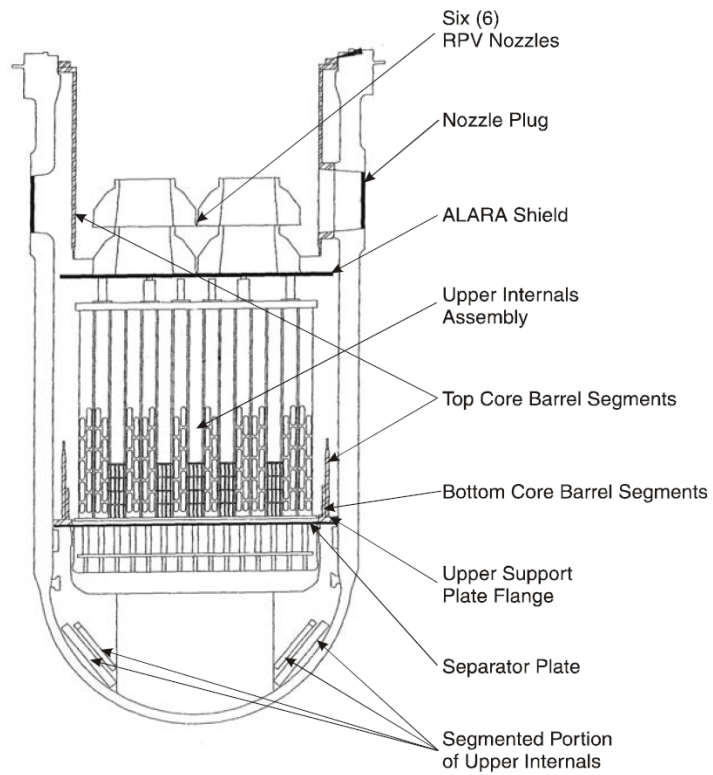


圖 4-8 反應器壓力槽處置時的內部結構

5. 運送罐操作及運輸

因為預期切割碎片會產生高劑量，原本打算使用特殊設計的容器 (A-43 high integrity container) 作為內襯，再裝入 TN-RAM 或類似的運送罐中進行運送。但由於切割碎片的數量太多，於是改用標準運輸內襯桶，以便有更多運送罐可用。

大多數的廢料使用 Duratek 8-120 桶運送，包括樹脂和過濾器廢料。雖然運送平均成本及標準儲存罐成本低於高活性廢料所需，但有些成本將移轉至大量廢料的處理上。

1. 爐穴清理

在 2001 年的年底，專案的切割部分已完成，FAS 罐也送到燃料廠房的燃料池中。但由於專案執行過程中的許多問題，產生相當多的爐穴清理工作，需要在後續除役行動中加以考慮。爐穴內部包含有：

- (1) 原有的過濾系統由於塞滿切割碎片，以致劑量很高。雖然在原始設計可用沖來洗降低輻射強度，但此一系統仍需要在水下切碎，再放入具有屏蔽的運送罐
- (2) 幾百英尺長的軟管因為堵塞，而暫時放置於爐穴內
- (3) 在過濾系統無法適時的收集切割碎片狀況下，大量碎片將附著在爐穴底部
- (4) 切割台需要在水下切碎、包裝和處置

2. 經驗回饋

- (1) 切割策略盡是可能得減少切割量，避免耗費太多的切割時間及產生過多的二次廢料。CY 選擇只切割 GTCC 材料，將它們放入尺寸較小的 FAS (類似於燃料組件大小) 密封罐。將二十六個 FAS 密封罐放入一個儲存容器後，再放入 ISFSI 的垂直混凝土

護箱(VCCs)中。儲存 GTCC 廢料與用過燃料的不同處，是 GTCC 不需要散熱，只需考慮儲存容器的外部尺寸是否適用於 VCCs，因此可使用內部中空的儲存容器，類似 Maine Yankee 電廠的做法。這種做法是允許 GTCC 材料切成較大的切割件放入儲存容器中。使用這種方法的切割次數較少，產生的切割碎片也較少，使得成本降低。這一切割策略也會減少物料的搬運問題，因為需要搬運的物料減少了

- (2) 評估設備可靠性及維護便利性是極為重要的，這些評估應包含碎片收集系統和切割系統
- (3) 所有設備完成整合性能測試，並確定其操作狀況良好之後，才容許將設備運送至廠房內。在全尺寸模型測試時，所發生的問題是比較容易處理的，若設備送往現場被污染後，發生問題就比較不易處理
- (4) 要執行精確的切割，則切割主軸的剛性及穩定性是非常重要的
- (5) 將核廢料部門和復原規畫納入整個專案計劃中
- (6) 在切割操作期間保持爐穴清潔
- (7) 因為切屑體積增加，決定將先前蒐集的廢料，由 A-43 內襯桶轉移到其他的標準運送內襯桶中，這將增加了爐穴污染以及事後爐穴清理的挑戰性

有一批參與其他電廠除役計畫的人員訪問 Connecticut Yankee，得以吸取 Connecticut Yankee 的教訓，對於後續的切割專案是非常有利。

4.2.5 Maine Yankee 電廠

1. 背景

Maine Yankee 電廠的擁有者和經營者是 Maine Yankee 原子動力公司(Maine Yankee Atomic Power Company, MYAPC)，此一電廠是 3 迴路 864MWe 的 PWR 電廠，為 Combustion Engineering 公司所設計。於 1972 年開始運轉供電，1997 年永久停機。此電廠在運轉期間是 New England 電網的重要電力供應者。

在電廠決定永久停機之後，董事會隨即批准了除役的決議。參考業界的除役經驗，Maine Yankee 試圖採用固定價格標執行除役，後來 Stone and Webster Engineering 公司得標成為除役作業承包商(Decommissioning Operations Contractor, DOC)。1998 年將電廠轉移給除役作業承包商，讓電廠進入冷卻、黑暗和乾燥狀態(cold, dark and dry status)，並執行主要系統的除污。

配合 GTCC 包裝及儲存的需要，Maine Yankee 早期的除役規劃包括建造一個 ISFSI (在核電廠除役之前並不存在的)。事實上，儲存在 ISFSI 的第一批密封罐(canister)所裝的就是由反應器內部組件切割出來的 GTCC 物料。反應器內部為獨特的爐心側板(擋板)設計，主要是由八大塊不銹鋼鑄件所構成的銲接結構。此種鑄造設計的爐心側板，比起其他電廠(擋板使用螺栓者)需要切除更多的 GTCC，或是使用更特殊的 GTCC 容器來包裝大型切割件。本專案參考 Yankee Rowe 的部分經驗，選擇了後者，將爐心側板切成大尺寸的切割件裝入容器內(圖 4-9 所示)。GTCC 廢料在送入 ISFSI 進行長期儲存時，需要使用 4 個密封罐。若未來 PWR 側板/擋板採用整體銲接設計時，將面對同樣的議題。

除役作業承包商 DOC 與 Framatome 公司(現在的 AREVA 公司)經協商後，簽訂固定價格合約，由 Framatome 公司負責切割反應器的內部組件。

在這種情況下，儘管 DOC 的合約為固定價格，但在進駐現場(site mobilization)之前，仍允許重要的供應商參於規格制定、工具設計及測試。此一做法明顯不同於先前 CY 電廠 DOC 所採取的做法。

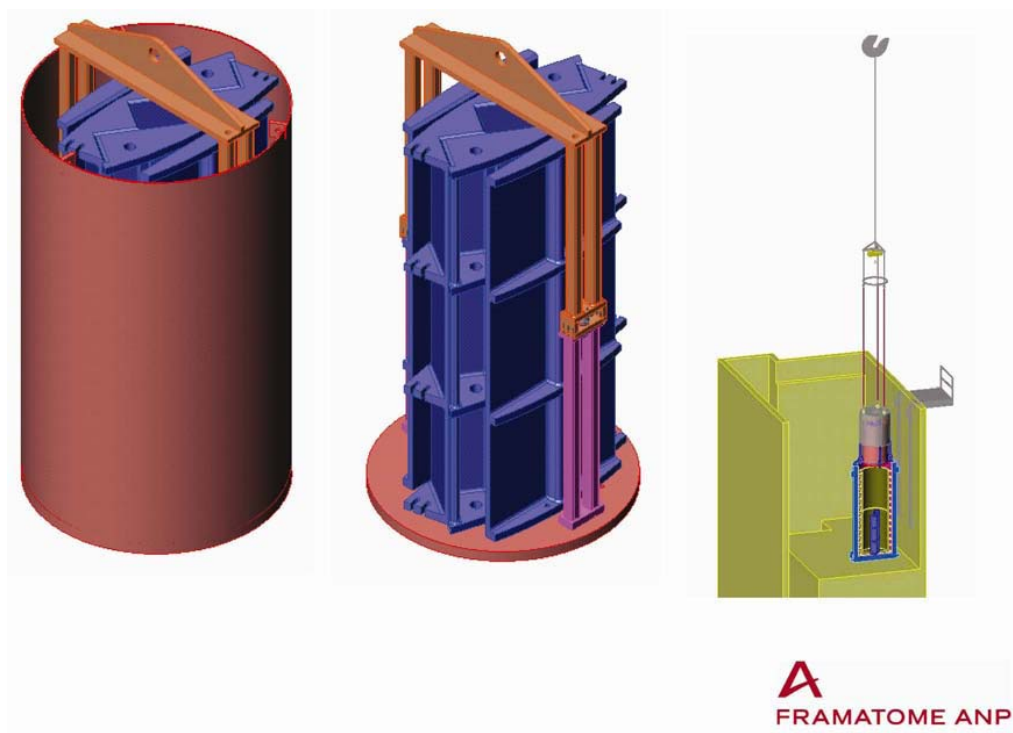


圖 4-9 GTCC 切片之運送及包裝(Yankee 切割概述)

在切割承包商在進入現場施工之前，DOC 發生了重大財務問題，雖然這問題與 Maine Yankee 合同無關，但因此由 Maine Yankee 接手全部的除役計畫。由於 Maine Yankee 的參與，除役計畫的執行立即發生轉變，由原先的 DOC 執行轉變成自我執行。轉變恰巧發生在切割設備進駐現場之前的最後測試階段，這時間點是非常重要的，特別是對爐內組件切割專案而言。

2. 切割規畫

依據爐內組件的特性分析，切割專案的目標是能將反應器容器完整的運送，就如同前面所提的其他電廠，Maine Yankee 反應器容器活度是超過 50,000 curies。因此需要將熱屏蔽，爐心筒及爐心側板等組件的上半部及下半部加以分離，並予以包裝，低活度組件則回填於反應器容器內。切割專案完成後使用駁船運送整個包件。爐心筒及熱屏蔽則裝入 3-55 密封罐運送到 Barnwell，爐心側板及爐心支撐板的切割相對較大塊，放入四個專為 ISFSI 處置場設計的特殊容器中。到目前為止，在所有執行爐內組件切割專案的電廠中，Maine Yankee 內部組件的 Curie 含量是最高的。原因是電廠停機後不久即決定進入全面拆除，預估反應器內部組件所產生的活度為 1,964,000Ci (7.4E16Bq)。

3. 承包商選擇

針對承包商選擇程序準備了一份很詳細的規範。DOC 準備了一份有重要設施輸入的規範。許多 Yankee Rowe 電廠的經驗回饋的被列入 Maine Yankee 規範中。規範並未明確制止承包商採用某種特殊的切割技術。所撰寫的規範除了支援投標程序外，它還成為 DOC 與 Framatome 公司(負責內部切割專案)固定價格合約的談判基礎。有一點是很重要的，一份詳細且高品質的規範對於計畫執行的規模是不能誇大的。選擇承包商的重點是考慮其工程技術支援、經驗、測試和測試設備，這些都是計畫成功的關鍵。參考 Yankee Rowe 使用電漿的經驗，Framatome 所做的選擇，是決定使用磨料水刀(abrasive water jet, AWJ)進行大多數的切割。

4. 工法

工具系統的核心是一個多軸機械臂及手臂末端夾持的 AWJ，視覺系統(水下攝影機)同時也納入機械臂的末端。雖然機械臂及其末端的 AWJ

適用於執行大部分的切割，但爐心支撐板(GTCC 材料)與爐心支撐柱的分離，則需特別設計一套銑削工具，並結合視覺系統及銑削碎片的切點(point of cut , POC)收集系統。為了將 GTCC 由非 GTCC 內部結構分離出來，爐心支撐板下方共有 261 個位置必須進行銑削，同時需要客製化設計和建造一個吊舉設備(如圖 4-10)來維持這種分離，搬運夾具隨著操作設備，夾持切割下來的爐內組件進行包裝。

重要的設計工作包括：切屑及銑削廢料之收集處理系統的設計和測試，以及爐穴水質狀況及化學條件的維護。



圖 4-10 協助內部組件舉升及定位的吊舉設備

建造切割站及部分的主限制結構的目的，是用來支撐爐內零組件，以及切割時限制切屑的移動。圖 4-11 所示是主要限制結構下檔板的照片。當主限制結構或切點收集設備均無法約束切屑移動時，使用交叉爐穴簾幕(cross cavity curtains)作為二次限制結構，用來阻止切屑的進一步遷移。

Framatome 公司經過大規模的測試，所設計和建造的固體廢料收集系統(Solid Waste Collection System, SWCS)，Framatome 公司擁有此系統的專利，對於收集及處理 AWJ 切削產生之切屑具有最佳效能。結合多層級設備所組成之 SWCS 能有效地完成任務，如圖 4-12。



圖 4-11 主要限制結構的下檔板

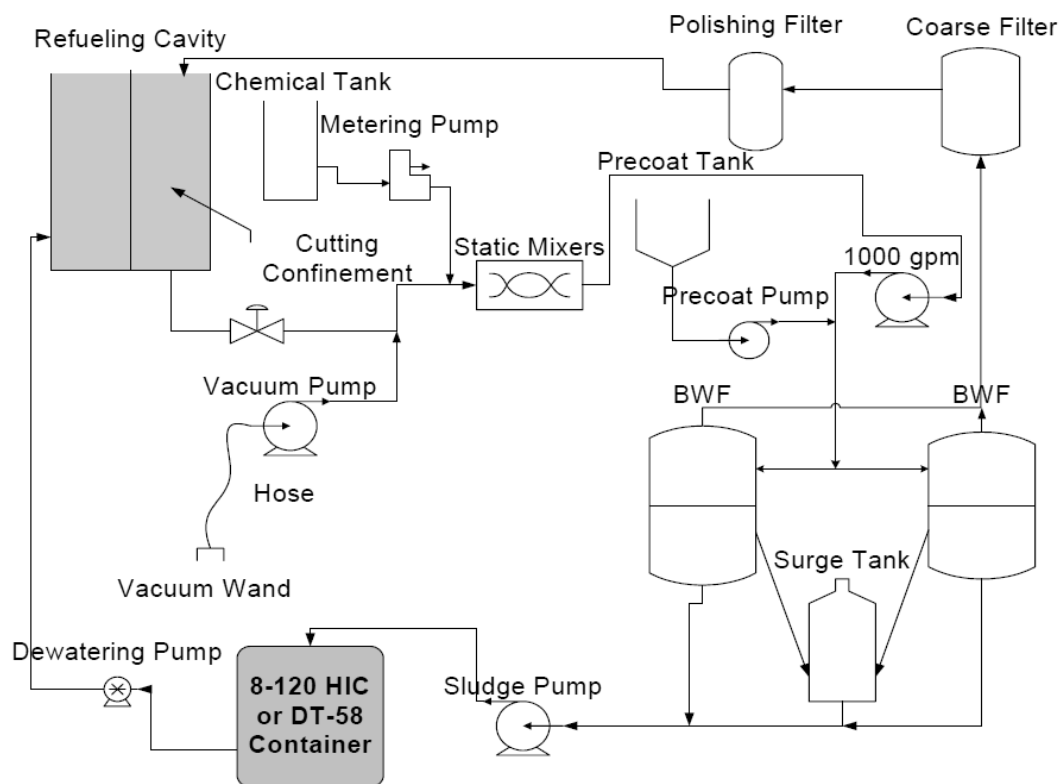


圖 4-12 固體廢料收集系統(SWCS)

SWCS 包括化學處理、反洗過濾及精製濾芯(cartridge polishing filters)。圖 4-13 是 SWCS 位於水下部分的照片。為了達到屏蔽的目的，大部分的 SWCS 安裝於爐穴內。剩餘的部分，包括最後的精製過濾器(polishing filters)和 8-120 高完整性容器(High Integrity Container, HIC)容器，則放置於加料台的屏蔽圍牆內。GTCC 切割所產生的較具活性的切屑，使用 SWCS 進行分離，再放入置於水下的 DT-58 內襯桶，這是一個新獲執照的特殊容器，然後裝入 TN Ram 運送罐送往 Barnwell。

爐水處理系統(Cavity Water Treatment System, CWTS)是一個獨立的系統，其中包括離子交換和過濾功能，原本是用來維持爐水的狀況，但

是最後經過重新配置，用來支援爐水清潔、洩水和最終排放。這項工作是屬於切割承包商的工作範圍。

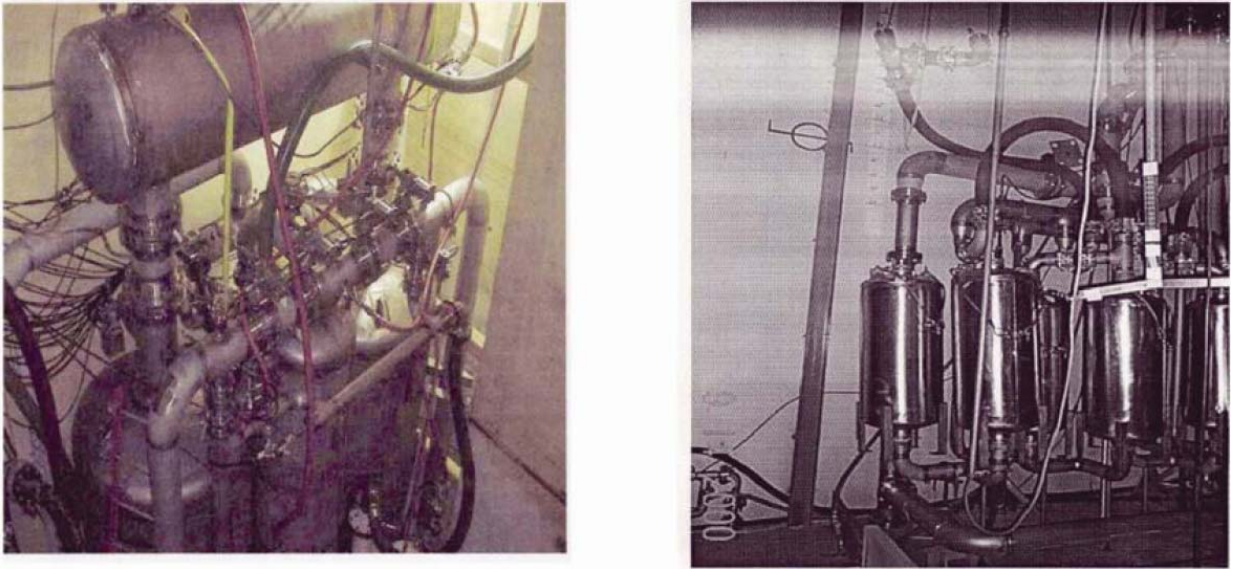


圖 4-13 固體廢料收集系統安裝於爐穴的部分

5. 測試

Framatome 公司在獲得合約之前就進行重要的測試，以確保分割專案中 AWJ 程序的可行性。這些測試包括收集和處理在切削過程所產生大量細小顆粒的切屑，這是十分重要的一項工作。

早期的測試工作是屬於理論驗證(Proof of Principal, POP)測試。這些測試是在承包商的設施中進行的小尺寸測試，這種方法可允許承包商針對較昂貴的模型施行縮小尺寸，以節省時間和資源。執行重要的 POP 測試以瞭解切屑的尺寸分佈，用以設計出正確的切屑處理系統。這些測試可清楚地證實系統在收集切屑及維持爐穴狀況的能力，而合約要求收集切屑中的切點(point of cut, POC)。經過了這些測試，Framatome 放棄為每一個切割，設計出個別收集器的企圖，而改採較為整體性的做法。

收集切屑的整體性方法，是將內部組件放置於收集盤和支撐結構上，以 SWCS 進行大流量的吸入。建構封閉的下檔板(如圖 4-11 所示)和頂蓋，以強化對於爐心區域之內部組件的限制。切削的序列”由冷到熱”，是指從外部的零件(熱屏蔽)開始切割，最後切割到最內部的組件(爐心側板)。如此的工作安排對於切割產生的切屑，可以非常有效的捕獲和處理。

完成組裝的機械手在承包商的工廠進行測試，機械臂末端的 AWJ 是否能夠準確地定位，進行徹底的測試和檢驗，這是一項非常重要的功能，因為若機械臂末端或其他部分出現輕微故障，在故障排除後，令其重返切割位置並接續切割路徑是相當重要的。在 CY 核電廠就是因為機械臂末端無法重新精確定位，進而造成切割時發生重大問題。

6. 實物測試

機械手在 Framatome 工廠的縮小水池中進行了良好的實物模型測試。這些測試包括切割實物模型和使用特殊夾具夾持切割件。儘管這些測試造成一些設備小幅度的修改，但由於先前所執行的理論驗證(Proof of Principal, POP)測試，仍然提供了許多對於機械手在設計、製造及操作能力上的驗證。

在承包商進行爐心側板實物模型的測試切割時，取水樣以分析金屬的濃度(百萬分之，parts per million [ppm])，將濃度資料輸入以 Microshield 電腦程式計算劑量(以爐心側板的活度為基礎)，可以預測爐穴邊緣的最嚴重的輻射強度，經由預測顯示在實際切割操作時的劑量狀況是可以被接受的。後來在實際切割爐心側板時，爐穴邊緣的輻射強度與預測值相當一致。若當初 Yankee Rowe 也能提供類似的爐穴輻射強度的劑量預測評估，應該可以避免發生關於劑量的爭議。

測試切割刀頭所攜帶之切屑破碎器(chip breakers)，確保在進行下格架與上格架分離作業時，小廢料(即切屑)的抽吸將不會堵住真空管線。這個問題常發生於的水下加工，在 Rancho Seco 內部組件切割專案也出現類似問題。建構一個正確且複雜的下格架模型，以驗證工具、視覺設備及切屑收集的能力。

無法將全尺寸的 SWCS 試驗納入切割測試中。切割測試將使用縮小的廢料處理系統。SWCS 試驗是安排在切割測試之後與現場部署之前，以驗證系統的功能。在處理程序中還有一個重點需要考慮，那就是 Barnwell 處置場可接受的切屑廢料形式，而這需要經過 Barnwell 處置場和南卡羅萊納州的正式批准。

7. 現場經驗

一個非常詳細的切割專案將規畫出所有的切割位置，來配合廢料包裝計畫。事實上，由於切割專案非常完善，所有的 AWJ 切割都依照原始計畫的安排。計畫安排切割從"最冷"到"最熱"的組件，以確保在切割"最冷"的組件時能獲取經驗回饋。本專案計畫另一個重要的特點是良好的 POC 收集器和切屑限制，可防止爐穴的放射狀況失去控制。本專案在設計階段即致力於適當的切屑收集和處理，這些努力讓專案獲得回報。事實上，爐心側板執行重切削的現場經驗，使得先前的測試得到驗證。2000 年 10 月開始進駐現場，到 2001 年 5 月 9 日完成最後的切割。為了確保承包商的測試程序能充分滿足專案的目標，進入現場的時間略晚於原先的規劃。由其他電廠的經驗得知，若急於切割來滿足時程，對於最後的時程、劑量和成本反而會付出更高的代價。

AWJ 切割遭遇的困難最小。當切割並非以直線貫穿整個區域時，視覺設備與 AWJ 末端的整合很容易得到驗證。系統對於切割位置的拾取

有良好的重複性，對緊鄰位置進行再切割的能力也很優秀。如前所述，CY 核電廠就是因為缺乏類似操作的能力，使計畫發生嚴重的延宕及問題。

SWCS 和 CWTS 表現很優異。SWCS 系統效率大於 99%，由於系統中反洗這一部分是非常有效率的，因此不需要更換濾芯，且可使最終廢料的體積減到最少。在原先的設計中並未預期 SWCS 有修理的需求，使用潛水夫便成為修理組件的最好方法。在切割完成後，潛水夫成功地移除 SWCS 系統。

位於爐心格架下方的內部組件需要以機械加工進行切割，使之與熱屏蔽、爐心筒及爐心側板分離開來，機械加工操作在反應器容器內進行的十分順利。但在最初嘗試將兩大主件予以分離(舉升)時，發現時無法以銑削完全切斷內部結構的盲焊道。在與原始 NSSS 承包商的一位退休經理討論後，將刀具重新定位並進行較深的加工，終於成功地加以舉升。由此可知原始照片其詳細程度並不足以充分描述原始的焊接情形。

完成最終切割之後，承包商執行徹底的爐穴清理、部分復原，以及保持爐穴狀況以配合後續的作業，這作業是指將 GTCC 材料裝入特殊容器並送往 ISFSI 儲存。因為承包商執行乾式密封罐儲存計畫的準備延誤及進展緩慢，妨礙了爐穴的最後清潔、處理和排水，直到 2002 年 5 月爐穴才能自由釋出。

Framatome 對於現場和指揮部的支援是非常出色的，任何現場問題可迅速被判斷解決。電廠人員和輻射防護(Radiation Protection, RP)人員全面參與該專案。電廠人員和承包商人員進行每日現場會議(內容包括場內及場外的支援)，使所有工作群組保持連繫與共同的工作目標。

整個程序在輻射防護上確實達到合理抑低(ALARA)的目標。承包商暴露劑量為 25 person rem(0.25Sv)，專案總劑量低於 52 person rem (0.52Sv)。這些劑量是反映整個作業的所有人員劑量，由承包商進入現場前的爐穴準備(5.4 person rem[54 mSv])開始，一直到最後爐穴的排水和清理。在回顧這些結果時，有一點很是重要的，就是請記住 Maine Yankee 需要處理爐心的內部組件有將近 200 萬 curie (7.4E16Bq)。

8. 運送罐操作及運輸

Maine Yankee 的計畫中對於廢料的處置，使用 3-55 罐、8-120b 罐、傳統類型 A 容器及 TN RAM 罐。共有十四個 3-55 罐用來盛裝爐心筒及熱屏蔽的切割件。切割爐心側板和較低的爐心板所產生之切屑，一共有兩次的運送，先將切屑裝入 DT-58 特殊容器後，再放入 TN RAM 罐內。其餘的切屑和過濾器的運送使用十四個 8-120b 罐執行。GTCC 材料裝入四個特殊容器存入 ISFSI 中，GTCC 材料裝入容器的工作並不是爐內組件切割專案的一部分，而是燃料乾式貯存計畫的一部分。當四個 GTCC 罐存入 ISFSI 後，該計畫隨後有 60 罐的燃料包裝進行乾式貯存。

運送需配合計畫時程，在 TN RAM 運送時遇到困難，原因是運送罐許可執照中要求證明罐中沒有內含液體，所以需要執行壓力測試以證明符合要求。但是，裝填切屑的 DT-58 內襯桶是以聚合物密封，會產生輕微的排氣，由於此一壓差而導致測試失敗。後來需要變更運送罐執照，要求能通過替代測試才允許進行運送。幸運的是，這並沒有延緩電廠的計畫時程，因為它與 GTCC 乾式貯存的準備工作是同時進行的。此問題與成本有顯著的關聯性。

9. 爐穴清理

正如前面討論、當完成切割並準備將 GTCC 送往乾式貯存時，隨即開始對充滿水的爐穴進行初步清理。當最後的 GTCC 移出爐穴後，承包商開始最終的爐穴清理、爐水處理、爐穴排水及復原工作。由於在切割進行時有效的捕獲和處理切屑，爐穴清理的執行是容易。爐穴清理對於整個計畫的劑量貢獻並不顯著。

10. 經驗回饋

- (1) 良好的計畫前測試不能誇大其價值
- (2) 核能蒸汽供應系統承包商(NSSS)提供反應器內部組件建構時的原始照片，而照片中所顯示的細節可能無法協助組件的精確移除。在下格架的分離作業時就發生這種狀況
- (3) 良好的工程技術和規劃，是使成功計畫的重要步驟，這點在 Maine Yankee 的切割專案中可得到證實
- (4) 使用大於燃料組件尺寸的密封罐來包裝 GTCC，可最小化 GTCC 的切削量。但這一策略可能由於缺少接收 GTCC 的 ISFSI 設施而遭到挑戰，因為 GTCC 組件是電廠中最具有放射性的組件
- (5) 團隊精神和對於所有利害關係人良好的溝通，是爐內組件切割過程成功的重要關鍵
- (6) 冷切削，特別是指 AWJ，已證明是切割爐內組件的好方法，並且可使輻射劑量符合 ALARA
- (7) 水下設備的連接方式應採用模組化設計，使用可快速拆解的接頭型式
- (8) 在完成最後切割之後，並且爐穴是保持在充滿水的狀況下，可以派遣潛水夫有效地執行一些水下修理及復原工作

- (9) 在專案執行之前，若反應器容器的水質淨化系統已被關閉了很長的一段時間，應進行容器內的水質採樣及規畫處理程序。水的活度可以達到 $1E-1$ uCi/ml ($3.7E3$ Bq/ml)以上
- (10)有關廢料包裝和廢料形式，需要仔細審視運送罐測試需求的相關細節。因早期規劃中對此有疏失，使得在操作時的產生問題

4.2.6 San Onofre Nuclear Generating Station Unit 1 電廠

1. 背景

San Onofre Nuclear Generating Station Unit 1 (SONGS 1)是一座 410MWe PWR(西屋公司)電廠，南加州愛迪生公司(Southern California Edison Company)擁有(80%)及負責營運，其餘的 20%為 San Diego Gas & Electric Company (SDG&E)公司所擁有。該電廠 1968 年開始商業運轉，於 1992 年 11 月永久關閉。除役工作在 1999 年展開，於 2001 年 2 月開始進場準備切割反應器壓力槽的內部組件，實際的切割動作則是在 2001 年較晚時開始。

當 SONGS 1 執行除役計畫時，南卡羅萊納州主管的 Barnwell 低放廢料處置場，是唯一可以接受加州公用事業(California Utilities)產生的 C 類核廢料的處置場。正如前述，南卡羅萊納州限制每個廢料包裝的活度需在 50,000curie ($1.85E+15$ Bq)之內，這是允許該處置場營運的部分條件。為了同時滿足聯邦和州的法規，SONGS 1 需要將 RPV 內部被歸類於 GTCC 的零組件加以移除及包裝，而包裝的方式是可以被能源部(DOE)負責延長儲存和最終未來處置的設施所接受的。

表 4-2 反應器組件特性彙整

Component Name	Total Weight (lbs)	Activity (Ci)	Co-60 Activity (Ci)
Greater Than Class C Waste			
Baffle Plates	8.88E+03	1.95E+05	1.16E+05
Core Formers	3.22E+03	7.95E+04	3.82E+04
Center Section of Core Support Barrel (78"(2m))	1.57E+04	3.93E+04	2.33E+04
Lower Core Support Plate	3.65E+03	1.70E+04	9.38E+03
Instrumentation Thimbles	9.00E+01	2.73E+03	1.62E+03
GTCC Totals	3.15E+04	3.34E+05	1.88E+05
LLRW Shipped Intact Within Reactor Vessel			
Upper Internals Region	5.69E+04	9.07E+02	5.82E+02
Core Region Internals	8.97E+04	3.81E+04	2.35E+04
Lower Internals Region	2.42E+04	3.44E+03	1.73E+03
LLRW Internals Subtotal	1.71E+05	4.24E+04	2.58E+04
Reactor Vessel Assembly			
Reactor Vessel	5.31 E+05	1.40E+03	3.63E+02
Reactor Vessel Insulation	1.13E+04	5.20E+00	3.41E+00
Closure Head	1.31 E+05	≪ 1	≪ 1
Reactor Vessel Assembly Subtotal	6.74E+05	1.41E+03	3.66E+02
Total for Vessel Package	8.44E+05	4.38E+04	2.61E+04
Grand Totals	8.76E+05	3.77E+05	2.14E+05
International Units	3 98E+03 Kg	1.39E+16 Bq	7.92E+15
Grand Totals			

在 2002 年 4 月 1 日對於反應器壓力槽、爐內組件和壓力槽絕緣層這些組件的放射性活度所做的估計，大約是 375,000curie (1.39E16Bq)。

表 4-2 的反應器組件特性彙整，是依據總活性、鈷 60 活性，以及 10 CFR Part 61 分類所作成的。反應器內部組件可分為兩類：超 C 類(GTCC)和低放核廢料(LLRW)。超 C 類組件需要在電廠內進行切割與儲存，而 LLRW 組件則可放入反應器壓力槽內進行包裝及處置。

GTCC 組件包括擋板組件、較低的(下半部)爐心支撐板，和位於活性爐心區域的爐心支撐桶(core support barrel)(長度約 2 米)。這些 GTCC 組件的活度約有 331,000 curies (3.31E16Bq)，約佔整體活度的 88%。其中擋板(baffle plates)的活度大約 195,000 curies (1.95E16Bq)，佔去全部 GTCC 活度的 59%。構成 GTCC 廢料的活化金屬約有 31,400 磅(14,255 公斤)。值得注意的是，那些被高度活化的儀表套管之末端也屬於 GTCC 材料，需要儲存於電廠的 ISFSI。但是這些套管末端的重量、體積和活度，相較於切割專案中的 GTCC 組件，是可以忽略不計的。

若其餘的內部組件符合 10 CFR Part 61 和 Barnwell 處置場對於 LLRW 的所有要求，可將它們放入反應器容器內，於 2002 年 4 月 1 日送往處置，這些 LLRW 內部組件的活度約為 42,400curies (1.57E15Bq)。這些 LLRW 內部組件與反應器容器本體的包件，包括反應器容器絕緣層和噴嘴，總重量約 844,000 磅(383,176 公斤)，所包含的金屬活性大約 43,800 curies (1.62E15Bq)。

2. 切割規畫

RVI 專案的目的是切割反應器壓力槽內部組件，根據它們的活度，移除超 C 類(GTCC)廢料並放入特定的廢料貯存容器，這些 GTCC 廢料放在儲存用過燃料的建築物內，隨後再轉送到 ISFSI，準備以後隨廢燃料一起存入經過核准的 DOE 處置設施。

前面詳細討論的反應器容器特性調查及內部結構，是依據一個高度工程化的反應器壓力槽內部組件切割和包裝專案所完成。SONGS 1 爐內組件切割專案直接受益於早期其他電廠的反應器切割專案，也就是在本報告前面所討論過的經驗，包括：

- (1) Yankee Rowe
- (2) Big Rock Point
- (3) Connecticut Yankee (CY)
- (4) Maine Yankee (MY)

SONGS 1 組織一個擴大的團隊，拜訪 CY 及 MY 電廠的切割專案以獲取相關經驗。他們訪問的目標是直接觀察切割操作和會晤關鍵人員，討論問題及汲取專案的相關經驗。經由這些動作所獲得的資訊，將直接納入 SONGS 1 切割專案之工程和規劃中。

其他附加專案所採取的行動

SONGS 1 爐內組件切割專案需要其他附加專案計畫的配合，以提高專案執行的效能。這些措施包括：

- (1) 失敗的原因分析

切割專案針對關鍵環節進行了一系列的失效分析。這些項目包括切割、包裝、池水過濾和液體處理等。

- (2) 產業檢討委員會

當準備對於反應器容器內部切割做出決定時，產業檢討委員會 (Industry Review Board, IRB) 被要求檢討區域的準備工作審查計畫 (Readiness Review Plan)，它將提供 SONGS 1 和其承包商的額外資訊，將納入計畫制定和計畫執行的考慮。

- (3) 輻射防護小組的 ALARA 計畫

SONGS 1 輻射防護小組積極參與全面性工作管制計畫(Work Control Plan)的發展。工作管制計畫的目的是：

- 確認所有在輻射管制區域執行的工作
- 列出執行工作過程中應該遵守的特殊預防措施
- 確認啟動工作的先決條件
- 估計工作會接受的約略輻射劑量
- 列出具體的輻射涵蓋範圍，並提供最接近的工作區，以確保工作者可以安全地工作，並接受合理的輻射暴露

3. 承包商選擇

切割專案是以工程規範作為選擇專業承包商的依據。SONGS 1 依照被核准的切割規畫及設計文件，選擇 PCI/西屋執行爐內組件切割。這些文件的內容包括設備、容器拆除順序、切割方法、切割件處理和支援系統等，以滿足專案的需求和期望。針對切割範圍內的爐內組件，WMG 公司進行制度化的活性分析，並在切割過程中導入現場調查對活化分析進行評估。

4. 工法及測試

SONGS 1 爐內組件切割專案選擇磨料水刀(AWJ)切割和金屬解體加工(MDM)作為其主要的切割方法。這是依據前述電廠曾使用這些技術所獲得的經驗回饋。由於 SONGS 1 專案的表現，在此特別詳細介紹這些先進的技術是如何使用。

PCI/西屋所執行的測試方案對此專案提供廣泛支援，以及良好的經驗範例。

(1) 磨料水刀切割 (AWJC)(圖 4-14)

磨料水刀切削加工是使用水中含有研磨介質的超高壓水流。AWJC 系統包括四個基本組件。一個超高壓正排量泵被稱為增壓泵(Intensifier Pump, IP)，此泵可將水加壓至 40,000 - 60,000psi(2.7E03 - 4.1E03 bars) 的範圍。位於增壓泵下游的衰減器用於壓力調節，可使水壓平順以減少壓力的波動。高壓水的流量為 1 到 3 加侖(3.8 至 11.4 lpm)，水流被強迫通過位於切割頭的小噴嘴，噴嘴口徑大約 0.020 - 0.065 英寸(0.05-0.165 cm)。高壓水流進入噴嘴的混合腔內，並且合併來自磨料傳輸系統的氣送乾磨料。磨料系統利用壓縮空氣將均勻分佈的磨料送抵切割頭，射出超音速泥漿的噴嘴與預定的切割面之間會保持一小段距離。

磨料水刀切割比起傳統切削有一些顯著的優勢，包括：

- 無熱切割—此一工法聲稱可消除工作材料中的熱影響區、再鑄層、工作硬化和熱應力。
- 灰塵和煙霧的最小化—排除了電漿切削中常出現的空浮，降低了廢氣收集和處理的要求。
- 不需的精加工處理—選擇適當的切削參數，例如，操作壓力、磨料選擇和進給速度可免除二次加工的需求。
- 全方位切割的執行能力—切割形狀僅受限於切割機械臂的位置控制能力。

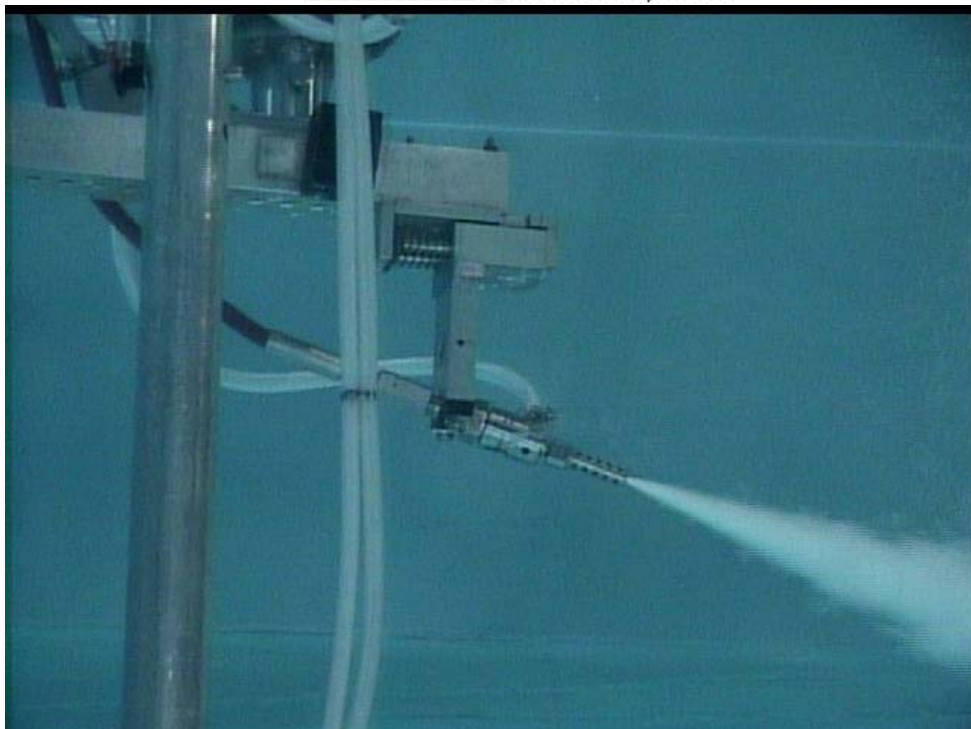
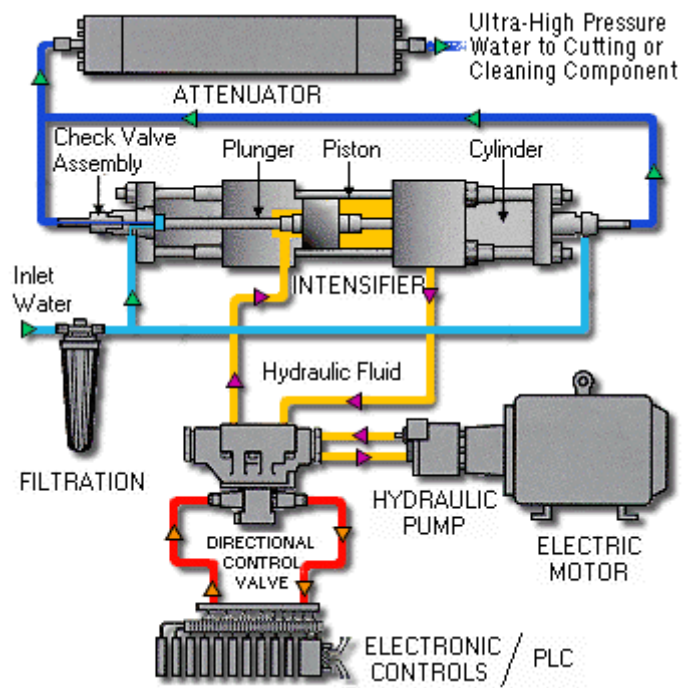


圖 4-14 典型磨料水刀切割系統

(2) 金屬解體加工(MDM)

金屬解體加工常用於破壞性切割專案。MDM 由工作表面移除金屬的過程，是在振動的負電極與帶正電的工件之間，產生一系列的間歇電弧。每次電極間的接觸被破壞時，都會產生高能量電弧，此時工件表面所產生的熔化金屬會形成球體且向上浮起，並被周圍的液體冷卻。冷卻系統的過濾程序可移除這種細微粉末狀的廢料。

電極通常由石墨製作，配合需求可以量身定做製成各種形狀。一般狀況下，使用簡單的圓柱或矩形棒作為電極。透過長電極在工作位置施行 MDM 加工，以氣動操作夾具連結導通切割頭與工件。

MDM 是一個相對緩慢的製程，材料去除率為大約 4 立方英寸(64 cc) 每小時。這一速度過程非常適合支架和螺栓的切割，這些通常是位於其他工具難以到達的位置。

(3) 主要切割設備

RV 爐內組件切割需要範圍廣泛的輔助設備包括：

- 工作控制中心：所有重要系統的控制設備都放置在這個指定的區域內。此一區域服務的對象有機械手駕駛台、AWJ 系統和 MDM 系統和控制設備、水過濾、HEPA 淨化系統、廢料管理控制設備和 underwater 影像控制和監視設備。(圖 4-15)
- 電力配送中心：位於工作控制中心是負責所有電源調節和配送的中心。
- 機械手駕駛台：機械手駕駛台是整個計畫中使用的主要組件。機械手提供四軸(X、Y、Z 軸平移和一個旋轉軸)的運動。多軸的機械手將切割頭載運到準備分割的組件旁，在電腦控制下切割頭遵循設定的切割路徑移動。駕駛台操作員需要使用屏蔽降低輻射暴露。(圖 4-16)

- 磨料水刀切割系統：包括的項目有控制、切割頭安裝設備、軟管等。
- 金屬解體加工系統：包括的項目有控制、切割頭安裝設備、軟管等。
- 材料搬運處理設備(例如，儲存架)：
 - 一輔助吊車
 - 一索具裝備
 - 一支撐架及夾具
- 切割台：切割台用於大多數的切割操作。它的設計是為了限制切割操作產生的廢料，預防污染在池內的擴散。此外，切割台的設計足以支撐被切割組件的重量。

(4) 水質淨化及廢料包裝

此一系統的性能與操作對切割程序是至關重要的。透過此系統可有效地去除池水中微粒及可溶的活性物質，使水的能見度維持在可接受的程度，且系統產生之廢料是可被最終處置所接受的。

根據之前其它切割專案所取得的經驗，清楚地顯示有效的水質淨化是非常重要的。藉由良好的水下能見度，可以輕鬆地呈現切割所產生之廢料可能造成的嚴重問題。能見度的退化將直接影響工作和專案的時程。同時，應遷移高活性廢料使其遠離切割區，因為這些廢料會擴大燃料更換樓層的輻射範圍。輻射範圍的擴大再加上工作區廢料熱點的累積，將使工作人員的暴露劑量明顯地增加。基於這些原因，高性能的水質淨化系統對於切割專案是至關重要的。



圖 4-15 工作控制中心



圖 4-16 機械手駕駛台

表 4-3 AWJ 廢料顆粒特性

顆粒尺寸(um)	超過此一尺寸之比例
518.5 um	0.1%
311.6 um	1.0%
266.0 um	6.0%
218.3 um	22.0%
170.3 um	50.0%
121.9 um	78.0%
81.75 um	94.0%
54.15 um	99.0%
42.91 um	99.9%

附註：

顆粒尺寸的中間值為 168 um

實體模型測試獲得之經驗值

水質淨化及廢料包裝系統是專為 SONGS 1 電廠量身定做的，在設計上是依據 Connecticut Yankee 的經驗再加上一些重大改良，是針對 AWJ 切割廢料處理系統所開發的獨特設計。受到廢料和地面空間有限的影響而產生輻射劑量，因此處理系統需要放置於水下。所有操作都採取遠端控制，在包覆屏蔽的工作控制中心中進行。為滿足連續 7 天 24 小時的工作時間，系統使用兩個廢料容器，當其中一個容器用來裝載廢料時，另一個則是處於脫水模式。

AWJ 切割廢料的成分包括高放射性金屬微粒及砂礫研磨介質，它們將由兩個高效率沉水泵抽離水池內的切割隔離區。旋流分離器可將水中的金屬碎片和大顆粒的研磨材料分離出來。然後水流通過矩陣排列且可反洗的預塗濾芯，這是針對預期的顆粒大小(表 4-3)所專門設計的。過濾器被塗上矽藻土(diatomaceous earth, DE)以改善過濾器的性能和延長

使用壽命。反洗循環是利用反向路徑的旋流排水通過過濾器來清潔濾芯。排出的廢料以不銹鋼桶槽加以收集，在反洗循環時廢料將由鋼槽排放到高完整性容器(High Integrity Container, HIC)進行處理和處置。污染的濾芯將由過濾器中移出，使用鐘形屏蔽罩傳輸設備運送到 HIC 處置。

過濾器放流管中的水流直接流到處理槽，此一壓力槽內含適當的材料可去除水溶性及細微顆粒的水中污染物。在原先的切割工作計畫中，該壓力槽是一滿載的活性炭床，但經驗顯示離子交換樹脂具有優越的性能，因此淘汰了活性炭。系統設計的基礎是在切割過程中使用一整床的材料。池水在最後清洗階段時，將處理槽裝入一床的混合離子交換樹脂，以滿足 SONGS 1 對於水質淨化 $1E-06$ uCi/cc ($3.7E-2$ Bq/cc)和電導率 $200\mu\text{S}/\text{cm}$ 的最終要求。原先估計達到所需的淨化條件需要 16 天的清洗時間。



圖 4-17 SONGS 1 水質淨化系統

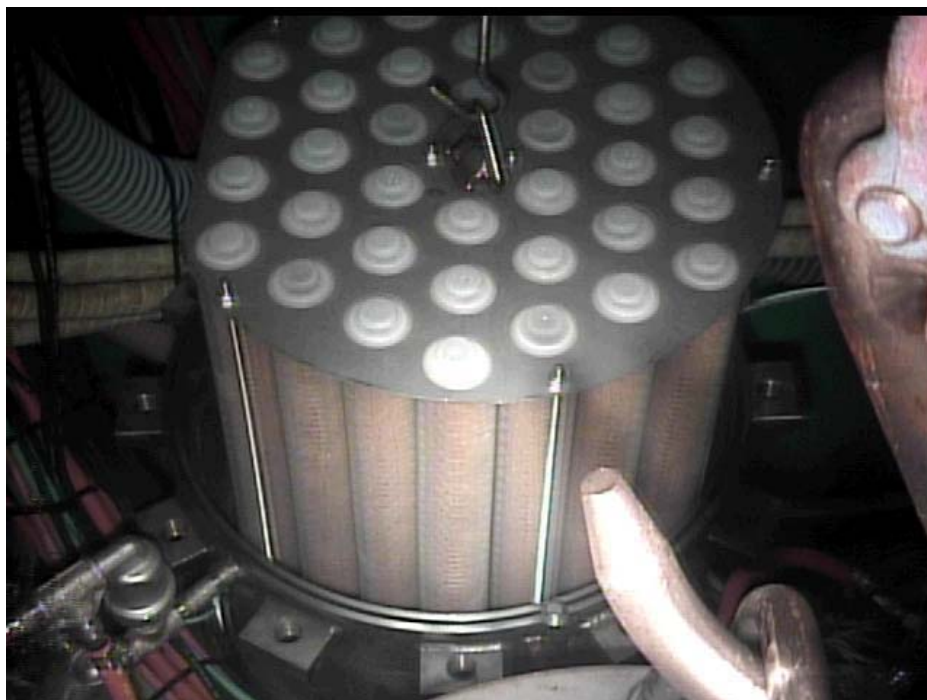


圖 4-18 淨化過濾器

5. 現場經驗

表 4-4 提供 SONGS 1 反應器容器內部切割專案的主要成就和統計。切割過程利用水下的遙控工具，如磨料水刀(AWJ)和金屬解體加工(MDM) 等方法切割內部組件並裝入專為 SONGS 1 設計的廢料容器。使用區域捕捉罩、二次限制結構和水下淨化系統，使得切割過程所產生的微小石榴石和金屬微粒能充分地被捕捉和過濾，讓池水的活度保持在限制範圍內。藉由精密切割、詳細的切割件規劃和搬運處理，GTCC 廢料被裝進 14 個廢料密封罐，且這些密封罐的尺寸適合裝入用過燃料罐中。最初的估算需要兩套廢料密封罐和 ISFSI 的儲存模組，但經由上述方法使得廢料量減少到僅需一套儲存模組。現場的工作時間略多於一

年，在輻射管制區(radiological control area, RCA)的工時超過 59,500 小時。雖然當初預估的暴露為 77.200 person-rem (0.772Sv)，但切割專案完成的實際暴露為 22.448 person-rem (0.22Sv)。該計畫完成時並未發生損失工時的意外事故，或是美國職業安全衛生署 OSHA (Occupational Safety and Health Administration)有記錄的傷害，這些都已超越先前電廠完成切割專案的標準。歸納 SONGS 1 暴露減少的原因為：詳細的規劃和 RVI 活度監測、ALARA 的實踐、有效使用屏蔽，和確認物質元件輻射強度的實地調查。

表 4-4 Songs Unit 1 反應器內部切割專案的主要成就

Project Element	Result Achieved
Overall Accomplishments	
Hours worked in Radiation Control Area	57,094
Lost time accidents or OSHA recordables	Zero
Total Personnel exposure	22.448 p-rem (0.23 Sv)
Radiation background level in work area maintained at:	< 2 mr/hr (.02 mSv/hr)
Water specification in pools maintained at:	<1E-03 uCi/ml (3.7 E(1) Bq/ml)
Water restored to pool following completion of segmentation work:	2E-05 uCi/ml (7.4 E(-1) Bq/ml)
Segmentation Cutting Details	
Abrasive Water Jet Cutting	
Number of cuts	322
Linear inches of cuts	9,821
Cutting Kerf Width (cm)	0.045
Cutting Time	292 hours
Medal Disintegration Machining	
Number of cuts	767
Cutting time	88 hrs
Reactor Internals GTCC Removed	
Components	
Mid Section of Core Barrel	
Baffles and Formers	
Instrumentation Thimbles	
Total Activated Metal Removed	27,000 lbs (12,000 kg)
Total Activity of Metal Removed	235,000 Ci (8.7 E15) Bq)
Waste Cans	14
Number of Fuel Canisters dedicated to GTCC waste storage:	1

6. 運送罐操作及運輸(包括廢料搬運)

經由旋流過濾器與反洗過濾器所移除的廢料，以泥漿形式輸送到 A-43 高完整性容器(HIC)，圖 4-19 所示，這是專為上述廢料及 SONGS 1 的 TN-RAM 桶所設計的有內襯容器。考慮切割廢料的活度，因此需要在水下進行包裝。同樣地程序產生之廢料包括樹脂床及用過濾芯，也放入內有適當內襯的 A-43 容器。

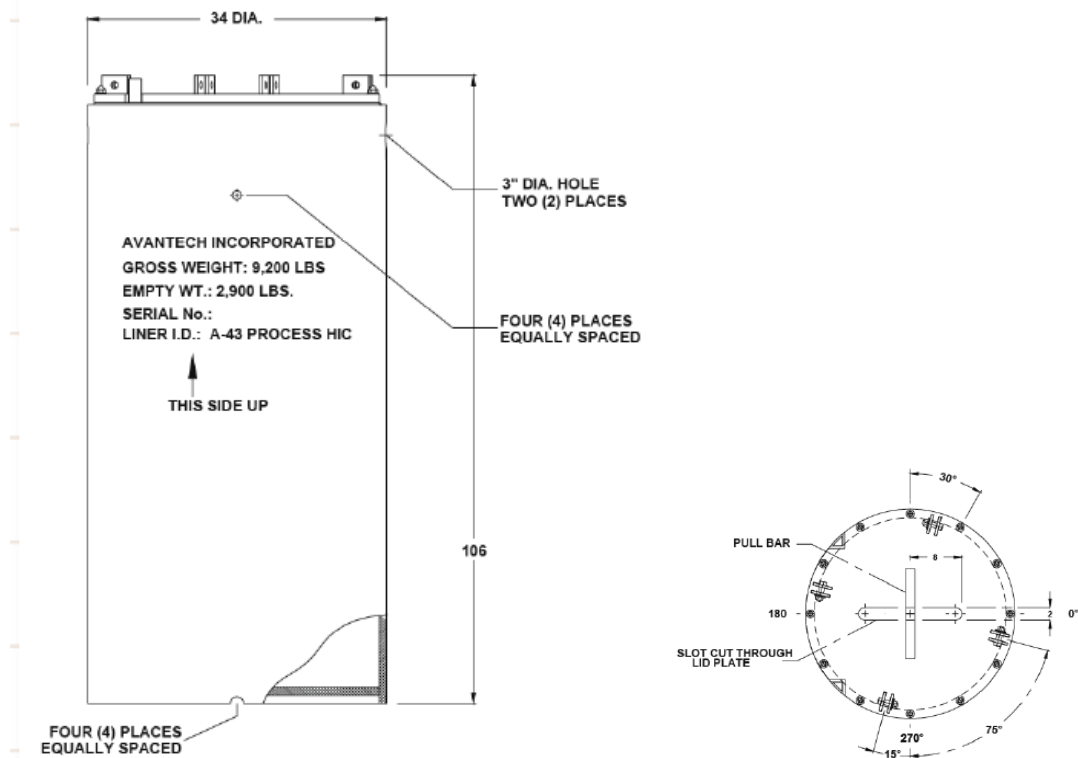


圖 4-19 A-43 高完整性容器(High Integrity Container, HIC)

表 4-5 為 SONGS 1 切割專案之水質淨化系統所產生的廢料量。樹脂廢料以水流沖入 HIC，而濾芯則是將水排出，運送是使用專門為此操作所設計的鐘形屏蔽。請注意前一版本的鐘形屏蔽是應用在 Yankee Rowe，此一方法允許這些廢料按照標準的工業作法進行水分去除。

表 4-5 Songs Unit 1 水質淨化系統廢料量

廢料種類	體積 cu. ft.
切割碎屑	90 (2.55 m ³)
用過濾芯	115 (3.25 m ³)
離子交換樹脂	50 (1.42 m ³)
總量	255 (7.22 m ³)

細沙/泥漿包裝系統是設計來接收旋流分離器及可反洗過濾器產生的 AWJ 切割廢料。放射性金屬顆粒與#80 石榴石的混合漿料被傳送到特別設計的容器中。該系統脫水能力可使"自由獨立液體(free standing liquid)"含量低於容器體積的 0.5%。在這標準之下，此一容器設計將可符合 Barnwell 廢料處置設施所有的廢料接收標準。

至於 GTCC 廢料則是使用特製的屏蔽容器，由圍阻體爐穴移入用過燃料池建築物內。

7. 爐穴清理

經由不斷努力的結果，切割區牆壁和地板的水質維持一定的清潔品質，切割後 SONGS 1 爐穴的清理依慣例施行。水下淨化組件在沖洗後劑量率仍高，因此決定以潛水夫進行拆解，這是最符合 ALARA 的方法，這一舉動從輻射劑量和後勤的角度來看都是較好的。

8. 部門責任，溝通與監督

以 SONGS 1 的維修工單流程(maintenance order process)及承包商的設備操作程序(equipment operating procedures)來控制整體的工作範圍。專案執行計畫(Project Execution Plan)和 HP 工作控制計畫(Work Control Plans)除了掌控特定作業外，也適用於工作控制程序。經由現場的定期監測和關鍵發展的認證，可對整個工作控制程序提供獨立的監督。承包

商主要負責的項目有切割、物料搬運工作、水質淨化、二次廢料收集、GTCC 廢料包裝、反應器重新包裝，以及最後的設備拆卸和清理。專案工作所選擇的統包方式可以善用專業承包商。運用設備性能測試、啟動前審查、時間表、行動項目及每日狀況會議等方法，可在滿足 SONGS 1 除役管理單位的期望，且不會影響後續大型組件拆除工作的狀況下完成專案。

SONGS 1 除役計畫是採取緊密的矩陣組織，由一位計畫經理領導，直接向董事會負責。由 SONGS 1 的維護、HP、操作、工程設計、和採購部門提供資源，以幫助承包商工作人員依照規範完成工作。工作範圍控制和遵守招標規範是專案經理和承包商現場經理的責任。在電廠舉行的每日進度會議可更新專案執行的狀態，解決突發問題，並為每天的工作計畫提供明確的方向。

9. 計畫重要里程碑

- (1) 簽約 2/28/00
- (2) 承包商進駐現場 2/15/01
- (3) 爐穴地板工作開始 3/27/01
- (4) C 類(含以下)的切割完成 10/3/01
- (5) GTCC 切割完成 11/16/01
- (6) 反應器容器分裝完成 1/16/02
- (7) GTCC 廢料傳送至燃料池 1/4/02
- (8) 承包商完成現場復原 2/28/02

10. 經驗回饋

SONGS 1 團隊努力學習由先前的切割專案獲取經驗，並確保有關資料被正式納入他們的專案中。SONGS 1 計畫成功的關鍵因素如下：

- (1) 發展全方位的專案執行計畫
- (2) 選擇可靠的設備，並進行必要的修改，在模擬現場狀況下，進行廣泛的設備性能測試
- (3) 利用經驗豐富的現場技術人員和機械人員
- (4) 在正式的啟動前審查中，應詳敘專案結束階段的工作規劃
- (5) 輻射防護計畫應勤於注意現場偵檢和工作區域清潔等相關細節
- (6) 潛水員可提供適當的水下工作支援

4.2.7 Rancho Seco 電廠

1. 背景

Rancho Seco 電廠擁有者和經營者是 Sacramento Municipal Utility District (SMUD)，是一座由 Babcock and Wilcox (B&W)所設計的 913MWe 2 迴路 PWR。於 1975 年開始商業運轉，在 1989 年 6 月經由公民投票決定停止運轉，隨即進入 SAFSTOR 狀態，並以累積的除役基金來支援電廠拆除。與本報告中其他的電廠相比較，Rancho Seco 電廠的供電運轉時間是相當有限的，因此反應器內部組件活性只佔輻射總活性的一小部分，也因此允許討論更靈活地內部組件切割程序。但是，所有工作仍打算在水下完成。

經過一番努力後，於 1997 年開始移除一些電廠的蒸汽系統，1999 年 7 月 SMUD 董事會授權進行全面除役。目前的規劃是 SMUD 保留電廠現址的所有權，移除所有設備但保留大多數建築結構，用過燃料則全部放入現場的 ISFSI 進行乾式儲存。

反應器內部組件切割專案於 2004 年 7 月開始，並於 2006 年 5 月完成。由於電廠的地理位置，需經由 30 英里(50 公里)的航道來運送整個

反應器容器，並考慮到反應器容器的接駁，決定執行 100%反應器內部組件的切割，隨即進行反應器容器的切割，並允許採用陸路運送切割件。

SMUD 將內部組件切割產生的 B 及 C 級廢料，裝入有特殊內襯為運送而設計的 Chem Nuclear 8-120B 運送罐。GTCC 廢料則放入一個特殊容器置於現場的 ISFSI 中。GTCC(特殊容器)罐的功能等同於燃料罐。

如前文所述，由於電廠運轉僅經歷一段有限的供電運作，以及爐內組件切割之前經歷一段較長的衰變時間，在爐內組件切割專案開始之初，Rancho Seco 爐內組件總活度剛好超過 73,000curies (2.7E15Bq)。

2. 切割規劃及承包商選擇

由背景討論中得知，反應器內部組件需要 100%切割，以配合後續反應器容器切割和運送。2003 年 9 月發出了一份委外服務建議書 (RFP)，對象包括執行內部切割承包商，電廠中負責輻射防護(RP)、廢料包裝的工作人員，及那些對於現場做有限度支援的維護設施和人員。Rancho Seco 電廠支援切割專案的層級是高於其他電廠的切割專案。事實上電廠對於本專案支援的程度，是遠遠超過原先的規畫，這些將在後面討論。

投標評比過程中，MUDS 選定的團隊是由 3 個單位所構成，Trans Nuclear、Duratek 和 Mota，並選用鋸切和銑削的機械方法來切割爐內組件。這是第一個大型商業核電廠完全使用機械的方法執行爐內組件的切割。並未其它電廠使用的方法，如電漿、磨料水刀(AWJ)、放電加工(EDM)和金屬解體加工(MDM)等。決策中的一個重要考量，是先前電廠對於小顆粒切屑的控制、收集和處理等過程常發生困難，這些小顆粒是指電漿切割的浮渣和 AWJ 切割的切屑，因此 Rancho Seco 選擇使用較傳統的鋸切和銑削方法切割爐內組件。如前文所述，由於電廠的輻射強度較

低，因此有較大的彈性，可以不必採用那些明顯高活度的反應器內部組件的切割工法。

3. 工法

由於反應器內部組件的形狀和厚度有各種樣式的變化，以機械方法鋸切和銑削的爐內組件切割，架設設備時需要使用許多不同的工具。而典型的使用多軸機器手臂末端攜帶的電漿或 AWJ，將具備有多功能性。

原先專案所設計的工具設備包括：

- (1) 往復式工具機(Reciprocating Machine Tool, RMT)，概念如圖 4-20 所示。工具為閘刀式鋸片，這是一把長 18 英尺(5.5 米)的鋸片。
- (2) 直徑 38"(1m)的硬質合金鋸片裝在 RMT 的刀塔架上，以垂直方式將腔室缸(plenum cylinder)、爐心筒和熱屏蔽等切割成片。
- (3) 環狀液壓操作切割設備(Circumferential Hydraulically Operated Cutting Equipment, CHORCE)，概念如圖 4-21 所示，是循圓形軌道切削之銑床，設計用來執行環狀切削，它可用於爐心筒和熱屏蔽的圓筒切割。
- (4) 螺栓銑削刀具(Bolt Milling Tool, BMT)，概念如圖 4-22 所示，設計用來銑切螺栓的頭部。將它裝在夾緊工件的軌道上，切削刀具為端銑刀，以銑去擋板結構上的螺栓頭。
- (5) 螺栓剪切工具(Bolt Shearing Tool, BST)，以液壓力量剪去附屬螺栓，以移除爐心筒的前板。
- (6) 加工屑片收集系統(Machine Chip Collection System, MCCS)，設計用來收集加工屑片予以包裝和處置。

- (7) 承包商提供了一套先進的液體處理系統(Advanced Liquid Processing System, ALPS)進行爐水清潔。ALPS 為了反洗需求進而增加一套 HIC 系統，又為了最後爐水的釋出，建造了 2 個 10,000 加侖(37,850 升)桶槽。
- (8) 由廢料承包商提供 8-120 桶的屏蔽傳送鐘，鐘內設計有 2 組噴洒環，可對特殊的 8-120 內襯桶表面進行除污，當 8-120 內襯桶放入爐穴中裝載爐內組件的切割件時，桶表面會被爐水弄濕。屏蔽鐘採用了 4.5 英寸(10 釐米)的鉛屏蔽，將它放在爐穴的水面上，下面是 8-120 特殊內襯桶，並利用屏蔽鐘所附的吊重裝置，將內襯桶由爐穴地板吊升進入屏蔽鐘內，再轉運到另一個屏蔽位置。
- (9) 除了原先的工法，還增加下述的工法：
- 在空氣中使用的手持電漿，這並不是原先所規畫的工法，用電漿在一頂帳篷內切割腔室組件。正如所預料的，如此將會增加原先所規畫的人員劑量。
 - 鑽石索鋸應用在腔室的初始切削，將熱低端(上部格架)(hotter lower end [upper grid]) 切除，並且用在將腔室切成長條形。這些都是在空氣中遙控執行。
 - 使用高枝鋸(pole saw)裁切外部的導引管。

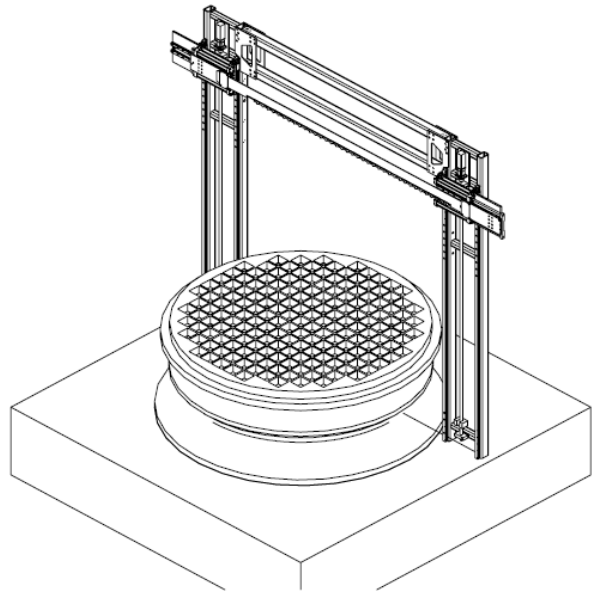
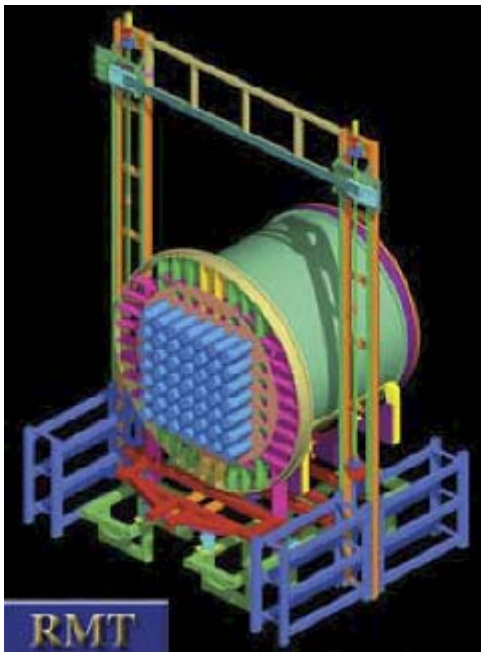


圖 4-20 往復式工具機(RMT)概念圖

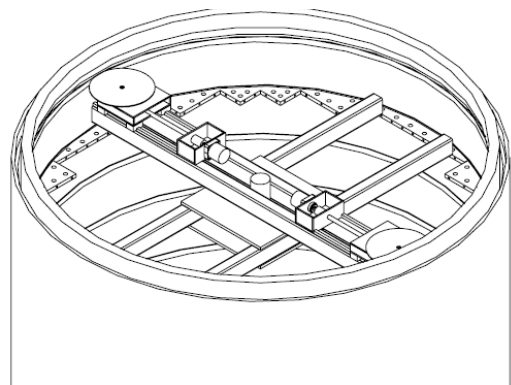


圖 4-21 環形液壓操作切割設備(CHORCE)概念圖

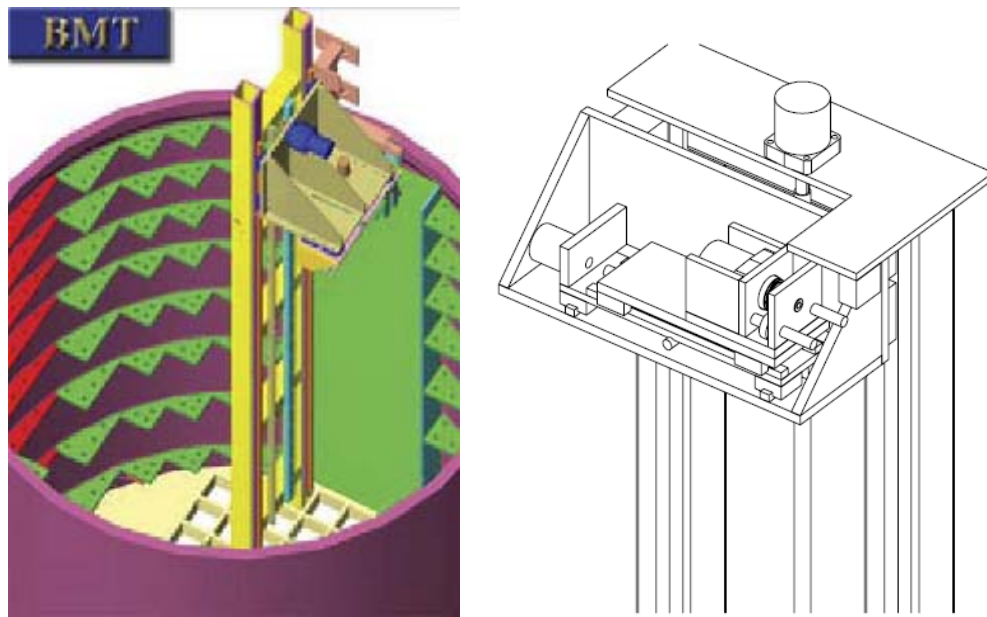


圖 4-22 螺栓銑削刀具(BMT)概念圖

4. 測試

由承包商執行切割工具的測試。雖然建構了一些爐內組件的實物模型進行工具測試，主要是針對工具操作進行的測試，並不是"高擬真"實物模型的測試方案。因為進行機械式切割需要非常多的專業工具，比起 AWJ 或電漿測試，機械式切割傾向涵蓋更多的積極性測試方案。例如對於機械式鋸切或銑削而言，剛性(強度)是非常重要的，試片與工具需要準確地反映出其剛性。在鋸切操作時，特別是 RMT 的 18'(5.5m)鋸片，需要更複雜的模型來反映出真實的剛性。所建造的模型需要與被切割組件的厚度相同，並且使用相同的切割工具和相同的夾緊機構(請參見圖 4-23)進行測試。



圖 4-23 往復式工具機實物模型測試

如下一節所討論的，測試程序對於 RMT 應用的支援並不夠積極。

5. 現場經驗

在 2005 年春季承包商的設備開始進駐現場。原本的規劃是輪班工作 4-10 個小時，在年底前完成專案。4-10 個小時輪班一直維持到切割腔室為止，在使用 RMT 切割時增加了第二班。實際的切削時間比原定計劃的要稍長，約在 26 個星期內完成。由於現場調度和設備調校的原因，切割開始的時間有所延遲。除了 RMT 之外的所有切割設備，在經過輕微的調校後，其功能即可接受。

清理和屑片收集系統的使用經驗則是不盡如人意。過濾器一般用於 5 或 10 微米和 10-20 mrem/hr(0.1-0.2 mSv/hr)的低劑量範圍。在銑削操作時放棄使用屑片收集系統，原因是銑削過程中屑片收集失效，以及所產生的絨毛球狀廢料會塞住軟管。最後決定讓屑片在切割過程中自由落下，在切割完成後以手動方式操作屑片收集系統和基本的水下方法進行屑片清理。

首先移除腔室上半部，並將其放在位於爐穴上半部的工作台上準備切割。然後移除爐心筒/下半部爐內組件，並將其放在位於爐穴底部的爐內組件支撐架上。此時允許使用 BMT 以銑削方式移除 GTCC 檔板，同時繼續在爐穴上半部進行腔室切割。

使用擁有 18 英尺(5.5 米)長鋸片的 RMT，試圖在水下以垂直方式鋸切腔室(高於爐心頂部的上半部爐內組件)。不幸的是，由於切割鋸片的破損，使得 RMT 切割過程不停的發生中斷。經過一番努力後腔室組件的垂直鋸切曾達到 1 英尺(0.3 米)的深度，但最終還是放棄使用 RMT，從此之後，基本上切割腔室的所有動作都不同於原先的規畫及方法。修改 RMT 設備，在刀塔座上安裝 38inch(0.96 米)圓盤鋸，完成了近乎全長的垂直鋸切。在爐穴內的水面下完成腔室的切割。由於工具使用上的問題，整個上半部腔室隨即由水中移出，並垂直放在一平台上，這平台原本是準備在空氣中切割蒸汽發生器底座時使用。先以鑽石索鋸將活性較高的上半部格架與腔室的其他部分予以分離，然後將上半部格架的頂部的上半部腔室移除並暫存於空氣中，如此便可將格架運回爐穴內，以 RMT 做進一步的切割。將腔室放置於蒸汽發生器底座上，然後以鑽石索鋸垂直切成兩個半殼。腔室半殼進一步以高枝鋸移除導引管，以及手持電漿移除外殼部分。腔室外殼則被裝入到重屏蔽 A 型廢料箱送往廠外處置。

儘管與原計劃有些偏離，RMT 18'(5.5m)鋸片還是成功地完成腔室格架和下半部爐心支撐結構的分割，而所謂偏離原計畫是指執行切割時需要將結構翻轉。當 RMT 在水下切割腔室不成功後，支援設備的數量較原先所規畫的大幅增加。如前文所述，某些爐內組件的活性總含量較低，而允許在空氣中切割。在空氣中的腔室切割是在一個帳篷內進行，

操作人員以手持的電漿和電鋸，完成腔室的切割。而腔室切割成了專案輻射劑量的最大來源。

較低的(下半部)爐內組件特別是爐心筒和熱屏蔽，使用 38i 圓盤鋸成功的完成切割。最初嘗試以 RMT 切割下半部格架但並未成功，後來將下半部格架以液壓千斤頂緊壓在爐穴牆壁上，切割方式是先切穿格架的 1/2，將格架在水下翻轉 180 度後，再切穿格架的其餘部分以完成切割。

從爐穴充滿水開始，水質透明度一直是個問題，判斷其原因是在壓力槽上方以索鋸切割 RV 頂蓋時，碳鋼碎屑落入壓力槽內所造成，這使得在剛開始切削的數星期中，爐穴內水質都不夠清晰。當大家對於造成的原因達成共識後，於是添加氫氧化銨以提高 pH 值和減少進一步腐蝕，增加 Tri-Nuc 過濾單元使水質更清晰。因為上述這些雜質來源(及液壓洩漏)而產生相當多的過濾器，但並沒有顯著的活性。使用低流量 ALPS 系統的目的並不是為了水質透明度，而是為了最終釋出池水進行鈾-137 及鈷-60 的移除(這點的確非常令人滿意地)。

雖然作業完成比原計畫大約晚了 5 個月，但與其他投標廠商的規劃比起來，專案執行所耗費成本和時間還是較少的。現場設備的獨創性、彈性和對於新方法保持開放態度使專案得以成功。電廠工作人員參與切割專案的現場執行，超過了其它電廠員工的參與程度，對於專案的成功非常重要。

6. 運送罐操作及運輸

專案產生的 A 類廢料裝入到四只 A 類內襯桶和十一只 A 類廢料箱運送至廠外處置。共 17 只 B/C 類內襯桶裝有大約 15,600Ci(5.8E14Bq)的反應器內部組件，準備在未來放入 8-120B 運送罐進行運送。在專案結束時將內襯桶存放於廠內準備未來進行處置。

7. 爐穴清理

2006 年 7 月完成爐穴的清理，清理爐穴對於專案總劑量或時程的影響並不重要。

8. 經驗回饋

- (1) 積極性測試加上良好的實體模式，可使工具和清理系統的不良表現減至最小。
- (2) 電廠工作群組和人員的大量參與，可幫助專案成功，有利於最終成本，且無明顯的時程延誤。
- (3) 影像系統對於觀察螺栓銑削刀具(BMT)的操作有些許效果。空氣中實體模式測試並未考慮水的折射。使用多部攝影機是非常有幫助的。
- (4) 幾起液壓油洩漏事件造成超過 3 周的延誤。使用替代性液體可能會有幫助。在使用電漿或 AWJ 執行切割時，並不產生明顯的浴缸環輻射問題，原因可能是顆粒尺寸及 Rancho Seco 爐內組件的輻射總含量較低。
- (5) 當電廠的爐內組件具有較低輻射量，可以在空氣中執行一定數量的切割。但是，即使是低活度反應器，其輻射劑量也高達 20 person-rem(0.2 person-Sv)，最主要的原因是在空氣中切割腔室。
- (6) 在空氣中執行切割時，由於帳篷的功能良好，並無空浮事件發生。
- (7) 不要在壓力槽上方切割反應器頂蓋，以及避免碳鋼碎片進入壓力槽內。
- (8) Rancho Seco 的經驗證明這種方法可適用於任何爐內組件專案。如有必要，可以在水下切割腔室。除了在頂蓋切割時增加

過濾器，可使二次廢料量減至最少。除了在水面上切割外，人員劑量也是最少的。整個專案執行的時間比其他電廠專案更少。

4.2.8 歐洲的電廠經驗

自 1979 年以來，歐盟執行委員會(European Commission)就開始進行核設施除役的研究和發展作業。2001 年有五個試驗性的除役計畫在進行。其中有一個是法國的用過燃料再處理設施 AT-1，其餘四個計畫則是商業核電廠。將這四個電廠的切割專案分別敘述如下：

1. BR-3 反應器

BR-3 位於比利時是歐洲第一座商業 PWR 電廠，於 1962 至 1987 年 (25 年)間進行商業運轉。在執行拆除作業前，先實施全系統的 Siemens Chemical Oxidizing-Reducing Decontamination (CORD)程序進行除污。BR-3 的爐內組件原為 Westinghouse 製造，在歷經兩個運轉週期後，1964 年予以拆除並置於燃料更換池中，BR-3 新的爐內組件稱為”Vulcain”，則歷經九個運轉週期一直到反應器永久停止。

切割專案分為幾個階段，第 1 階段是切割熱屏蔽，第 2 階段是切割 Vulcain 組件，第 2b 階段是切割 Westinghouse 組件。第 1 階段切割熱屏蔽主要的切割方法有電漿、放電加工及機械式切割，熱屏蔽為一不銹鋼圓筒，厚度約 3 吋(7.6 公分)，高約 8 呎(2.4 公尺)，直徑 4.6 呎(1.4 公尺)。比較三種切割方法對於熱屏蔽模型實施冷測試(如表 4-6)

表 4-6 熱屏蔽模型實施冷測試之切割比較

切割方法	(相對)有效切割速度	(相對)接受劑量	(相對)二次廢料量
放電加工	1/4	-3	-5
機械式	1	1	1
電漿	1.6	-1	-5

由表得知電漿切割的速度最快，但若考慮電漿的切割準備時間及切割碎屑清理時間也較長，因此實際電漿切割速度僅略快於機械式切割。而機械式切割的優點有：技術的成熟度、廢料量體積減少、沒有煙及氣之排放。參考熱屏蔽的切割經驗後，第 2 階段採用機械式切割 Vulcain 及 Westinghouse 組件，圓盤鋸用於較長的水平切割，帶鋸是用於水平及垂直切割。同時也使用其他特定用途的機械式切割：(1)液壓剪用於較薄的零件；(2)鑽孔機用於協助帶鋸機；(3)往復鋸切斷貫穿管；(4)放電加工精準的切除難以靠近的螺栓。在切割反應器容器時選擇相同於內部組件的切割工法，將反應器容器移入燃料更換池，以圓盤鋸作水平切割，帶鋸作垂直切割，再將切碎的切割件放入特製的密封罐。由 BR-3 所獲得的經驗回饋有：

- 在切割熱屏蔽時，比較電漿、放電加工及機械式三種切割方法，機械式切割最有效且廢料量最少
- 在機械式切割中帶鋸切割的效率又比圓盤鋸要佳
- Westinghouse 組件(歷經兩個運轉週期)與 Vulcain(歷經九個運轉週期)的活性強度的等級相同
- 雖然 Westinghouse 組件歷經 31 年的冷卻，但其輻射強度仍高，並未使切割更有利

2. Gundremmingen KRB-A

KRB-A 位於德國是 237MWe 的 BWR 電廠，於 1966 至 1977 年 (11 年)間進行商業運轉，1983 年開始除役。在除役過程中使用一種創新的加工方法”冰鋸(ice-sawing)” ，作法如圖 4-24 所示，是將熱交換器注入水，以冷空氣使其凍結後，再以帶鋸進行切割。

此一工法的優點是：(1)減少局部的劑量率；(2)熱交換器的管件獲得固定及支撐；(3)切割過程煙霧的產生最小化；(4)可使冷卻鋸片。

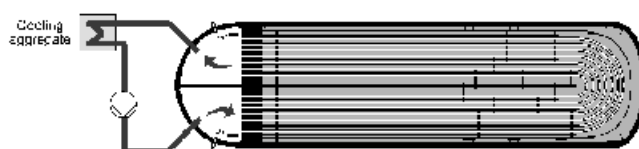


圖 4-24 冰鋸概念圖

3. Greifswald KGR

KGR 位於德國，採用俄國的 VVER 設計，廠內規劃有八座 PWR 反應器，於 1973 至 1979 年，前四座反應器先後開始商轉，德國統一後(1990 年)永久停機，隨著第五座反應器也停止運轉測試，其餘的三座反應器也停止興建。在 1995 年第五座反應器開始除役，其餘的四座將於 2000 至 2005 年進行除役，這將是世界上最大的除役計畫。

計畫的特點是在廠內建造一座中期儲存設施(Interim Storage North, ISN)，反應器或用過燃料池中的燃料，將移往 ISN 進行乾式存放。至於反應器容器及其內部組件將完整地移除並放入 ISN，等到經過若干年的衰減再加以切割。

4. Windscale Advanced Gas-cooled Reactor

Windscale Advanced Gas-cooled Reactor 位於英國，於 1963 至 1981 年 (18 年)間進行商業運轉，反應器以 CO₂ 為冷卻劑，石墨為緩速劑。此一反應器的設計不同於 BWR 或 PWR，因此除役所面對的問題也不相同。

共有 247 根豎管穿透反應器容器，主要以電漿切割移除。以工業氧乙炔火炬對於半球狀的反應器容器上蓋做環狀切割，切下的大型物件將移往低輻射區做進一步的切割。氧乙炔火炬是架設在軌道車輛上，以遙控方式操作。經驗回饋包括：

- 以輻射劑量作為選擇拆除及切割方法的主要標準
- 將大型零件及次組件由高輻射區移往低輻射區做進一步的切割
- 在對輻射零組件施工之前，需要進行非輻射零組件的拆除及切割測試

4.3 切割技術彙整

在這份報告的前面提供背景說明，詳細描述各個電廠如何進行爐內組件切割專案。表 4-7 彙整各個電廠採用的切割方法和選擇這些方法的原因。表 4-7 也列出了整體結果或專案過程中遇到的主要問題。

表 4-7 切割技術彙整

電廠	切割方法	選擇基礎	整體評估
Yankee Rowe	電漿 金屬解體加工	可靠度及速度的驗證 較大的操作深度及近接能力	電漿切割高活性材料產生劑量及污染
Big Rock Point	水下液壓銑削 機械式剪切機	工作區域受限	較低活性的BWR允許使用機械方法
Connecticut Yankee	磨料水刀 金屬解體加工	工作者劑量、空浮污染、 廢料形式及時程	整合測試/設備需要精確度，水質淨化設備不適當
Maine Yankee	超高壓水刀 機械切割	不執行熱切割	設備整合測試使得專案成功
SONGS Unit 1	磨料水刀 金屬解體加工	切割速度及空浮污染控制	其他電廠的經驗回饋使得專案成功
Rancho Seco	機械式切割 液壓分離	可靠的設備 機械技術	機械切割是可接受的， 正確的工具不可少的

表 4-8 所提供的統計數字，是從各個電廠爐內組件切割專案整理出來的。依據表 4-8 顯示，隨著經驗的積累和實施程序改進，使用磨料水刀切割可改善輻射暴露。還有一個改進意見也反映給以後的專案，就是在現場應用之前須增加對設備的測試。

表 4-8 各個電廠切割專案統計比較

電廠	RPV 活性 Ci (Bq)	切割長度 ft (m)	輻射暴露	廢料體積 ft ³ (m ³)	過濾流量 gpm (lpm)
Yankee Rowe	0.9 M Ci (3.4 E16 Bq)	爐內組件 全部切除	100 rem (1 Sv)	無法比較，除GTCC 外所有爐內組件皆 以廢料裝運	75 gpm (284 lpm)
Conn Yankee	0.8 M Ci (3.0 E16 Bq)	1800 ft (550 m)	205 rem (2.05 Sv)	1250 ft ³ (35.4 m ³)	Approx. 250 gpm (950 lpm)
Maine Yankee	2 M Ci (7.4 E16 Bq)	1170 ft (355 m)	50 rem (0.5 Sv)	1700 ft ³ (48 m ³)	1000 gpm (3,785 lpm)
Songs Unit 1	0.4 M Ci (1.4 E16 Bq)	813 ft (248 m)	23 rem (0.23 Sv)	254 ft ³ (7.2 m ³)	1,500 gpm (5,700 lpm)
Rancho Seco	0.07 M Ci (2.7 E15 Bq)	切成大塊	20 rem (0.2 Sv)	Approximately 1,130 ft ³ (32 m ³)	200 – 600 gpm (930 – 2800 lpm)

4.4 爐內組件切割的替代方案-完整處置

依據美國運輸部(Department of Transportation, DOT)和核管會(NRC)的規定，反應器容器在運送與處置之前，並不需要移除反應器內部組件(RVI)。去除 RVI 的目的是因為大多數電廠的核廢料只能送往南卡羅萊納州的 Barnwell 處置場，該處置場限制每個包裝不得超過 50,000curies (1.85E15Bq)。接下來討論的替代方案，是一座可供核電廠使用且沒有接收限制的處置場。Barnwell 設施除了少數幾個州外，對於其他電廠即將關閉，新處置場的選址是應加以考慮的選項。

4.4.1 背景

Trojan 核電廠是一座 1,130 MWe 四迴路的 PWR，位於 Oregon 西北部的哥倫比亞河旁，擁有及操作者為 Portland General Electric (PGE)。在經過約 17 年的商業運作後，由於必須更換部分蒸汽產生器，在考量相關財務後，決定於 1993 年永久停機。由於大型組件移除計畫的成功進行，在 1995 年 Trojan 處置了四個蒸汽產生器及調壓器，PGE 對反應器容器及其內部組件的處置，提出並實施一種創新的作法。反應器容器及爐內組件移除專案(Reactor Vessel and Internals Removal Project, RVAIR)，結合了獨一無二的設計與許多開創先例的法規核准。在這個獨特的除役專案中，對於領導電廠和專業承包商所組成的多元化團隊而言，有效的專案管理技術是不可或缺的。PGE 對於規劃、團隊建構、溝通、成本控制、品質管理、風險管理等特別重視。

反應器容器和內部組件的放射性總量，包括內部組件的表面污染活性及以及中子活化的金屬結構之活性。從最後一次的反應器運轉之後，經過五年的放射性衰變，估計反應器容器及爐內組件的內表面污染活性

為 $155\text{Ci}(7\text{E}12\text{Bq})$ ，以及 $2,010,000\text{Ci}(7.4\text{E}16\text{Bq})$ 的活化金屬。基於反應器容器和爐內組件所含之放射性，建議 Trojan 反應器壓力槽以一次且單獨的方式運送，並依據 10 CFR 71 (Title 10, Code of Federal Regulations, part 71) 法規採用 B 型運輸包裝。依據 NRC 和華盛頓州的規定，PGE 評估反應器壓力槽可以被歸為 C 類廢料進行淺層陸上處置。在壓力槽外表須加以除污及覆蓋塗層，使污染值符合 10 CRF 71 及美國運輸部 (Department of Transportation DOT) 的規定限制。

4.4.2 方法

PGE 包裝反應器容器及其內部組件，以反應器容器本體作為放射性物質的屏蔽容器，將其從圍阻體中移出後，使用駁船沿哥倫比亞河而上，最後將 1,020 ton(925 噸) 的包封放入華盛頓附近的 U.S. Ecology 低階核廢料處置設施。

4.4.3 RVAIR 專案的優點

選擇 RVAIR 專案處置反應器容器及爐內組件，所提供的優點多過先前處理反應器容器和內部組件的標準方法。選擇 RVAIR 使得廢料總體積少於預計。RPV 被列為 C 類廢料，因而允許放入 U.S. Ecology 低放廢料處置設施中進行處置。選擇 RVAIR 預估會產生 8,341 立方英尺 (236m^3) 的 C 類廢料，包括反應器容器、內部組件、和安裝屏蔽等。若選擇將反應器容器及爐內組件切割拆解，預估會產生 18,320 立方英尺 (519m^3) 的低階及高階放廢料。

選擇 RVAIR 估計其輻射暴露是低於組件切割選項的各種情況。RVAIR 專案對於現場工作人員的實際輻射暴露為 72.225

person-rem(0.722 person-Sv)，運輸工作人員估計為 0.09 person-rem(0.9 person-mSv)，處置設施工作人員為 0.2 person-rem(2 person-mSv)和一般民眾為 0.02 person-rem (0.2 person-mSv)。若選擇切割移除反應器容器及爐內組件，估計其輻射暴露分別是現場工作人員 133 person-rem (1.33 person-Sv)、運輸工作人員 1.06 person-rem (10.6 person-mSv)、處置設施工作人員 4.2 person-rem(42 person-mSv)和一般民眾 0.48 person-rem (4.8 person-mSv)。

選擇 RVAIR 則只有一次核廢料運送，選擇切割移除至少會有 45 趟的運送（假設反應器容器的運送為一件）。使用駁船和運輸裝備進行一次緩慢的運送，或使用卡車在公路上進行 45 趟運送，明顯地前者可減少潛在的生命損失或傷害。

最後，以 1996 年的美元為基準，選擇 RVAIR 的實際成本為 21.9 百萬元，而選擇切割處理估計費用將達 38.4 百萬元，可省下 16.5 百萬美元的費用。選擇 RVAIR 成本較低的主要原因是 Trojan 不需要處置 GTCC。當 GTCC 未被核准放入低階核廢料處置設施進行掩埋時，需要存放在 Trojan 電廠內(無限期)，直到有合適的儲存庫可用時。RVAIR 專案吸引人的地方是可以替除役基金節省約 17 百萬美金。

Trojan 核電廠反應器容器及爐內組件處置採用的替代辦法應納入考慮，RVAIR 專案的做法被確認對於員工、民眾和環境是最安全，且最具成本效益。使用這個創新的方法處置反應器容器及爐內組件，已得到眾多監管機構的認可。

5 Rancho Seco 電廠反應器爐體切割經驗

5.1 簡介

本章節主要是參考「Rancho Seco Reactor Vessel Segmentation Experience Report, EPRI 1015501, 2008.」研究報告，這份報告主要是敘述 Rancho Seco 電廠反應器爐體切割經驗的相關經驗。

近年來(本報告於 2008 年 3 月出版)美國四個主要除役中核能電廠 (Trojan、Maine Yankee、Connecticut Yankee 及 Yankee Rowe)都將 RPV 爐體視同單一廢棄物包件進行最終處置，且大部分案例中，電廠將超 C 類放射性廢棄物切割移出爐體，其餘非 GTCC 爐內組件裝填回爐體內，再將 RPV 爐體認證視同為放射性廢棄物運輸包件，這類大型放射性廢棄物包件運輸作業，涉及從電廠到最終處置場之間的道路、鐵路、駁船等運輸相關綜合性問題。Rancho Seco 核能電廠針對該廠到南卡羅萊納州 Barnwell 處置場間可能的運輸路徑進行細部評估與調查，結論是 Rancho Seco 核能電廠因其所在位置，基於運輸路徑限制條件，無法容許將 RPV 爐體採用先前慣用的整體單一包件處置之方式，RPV 爐體切割後再運送到處置場為唯一可行方案。即使 Rancho Seco 核能電廠因其運轉時間較短，RPV 爐體放射性強度明顯較低，Rancho Seco 爐體切割計畫仍足以呈現此類大型物件切割及處置技術重大進展。整體而言，Rancho Seco 核能電廠爐體切割計畫高度成功，且在人員輻射暴露、預算經費、工作期程等主要目標均能順利達成。

5.2 經驗及作法

美國境內完成除役之商用核能電廠，Rancho Seco 核能電廠因其地理位置運輸條件限制，成為曾正式商轉之核能電廠中，唯一選擇將 RPV 爐體切割後處置之電廠，其特殊經驗亟具參考價值。以下將逐一陳述 Rancho Seco 核能電廠之基本資料與該廠除役重要里程，RPV 爐體基本資料、爐體特性調查結果、以及爐體切割、包裝、運輸等實際工程作為與經驗。

5.2.1 Rancho Seco 電廠除役基本資料及爐體除役策略

Rancho Seco 核能電廠為 PWR 電廠，基本資料如表 5-1。

表 5-1 Rancho Seco 電廠基本資料

機組型式	PWR
功率	913MWe
設計	Babcock & Wilcox (B&W)
業主	Sacramento Municipal Utility District (SMUD)
廠址位置	沙加緬度，加州，美國
商轉	1975年
停役	1989年6月(公投)
累積全功率運轉時間	2144.2天，5.9年

Rancho Seco 電廠自 1989 年停止運轉後，選擇先行進入安全儲存 (SAFSTOR) 狀態，安全儲存期間電廠放射性將可持續衰減，並可容許除役基金累積到足以因應後續拆除除役經費需求，原先預期於 2008 年才開始拆除工作。1991 年該廠決策將採行用過燃料乾式貯存措施，此舉預計可將電廠提升為強化 (hardened) 安全儲存狀態，並可顯著的裁減員工數量。2002 年完成用過燃料乾式貯存 (ISFSI)，共有 21 組燃料密封鋼筒與護箱。1997~1999 年進行先期除役計畫，拆除汽機廠房系統

與部分桶槽。1999 年 6 月全廠除役工作開始全面進行，2007 年初完成反應器爐體切割計畫。

RPV 爐體拆除、處置之工程方法選擇，為核能電廠除役關鍵議題，其中從電廠廠址到最終處置場運輸方法與路徑選擇，必須先行評估決策，依據美國除役電廠經驗，將 RPV 爐體視同單一廢棄物包件進行最終處置，最具經濟效益。Rancho Seco 電廠針對 RPV 爐體放射性廢棄物處置運輸路徑評估，於 2001 年秋天初始規劃，將 RPV 爐體及爐內組件整合為長 38 英呎(11.6 公尺)、直徑 18.5 英呎(5.6 公尺)、重量為 454 公噸單一包件，運送到 Barnwell, South Carolina 處置，完成三條運輸路徑規劃。

- (1) 陸路運送到 Stockton(舊金山東邊)，駁船海運經巴拿馬運河或繞經南美洲，再到南卡羅來納州。
- (2) 鐵路運送到休士頓，由墨西哥灣駁船海運到南卡羅來納州
- (3) 鐵路運送到猶他州或南卡羅來納州

評估結論是，因運輸條件限制，RPV 爐體視同單一廢棄物包件進行最終處置並不可行。唯一最具經濟效益之可行方案為，將 RPV 爐體及爐內組件切割後，將 Class A 放射性廢棄物運送到 Clive, Utah 最終處置場。

Rancho Seco 電廠除役計畫主要特點如下列：

- (1) RPV 爐體切割拆除，而非整體移除(one piece removal)
- (2) Class A 放射性廢棄物運送到 Clive, Utah 最終處置場
- (3) 廠內建立占地 10 英畝之獨立用過燃料貯存設施 ISFSI (Independent Spent Fuel Storage Installation)，用以儲存用過核燃

料以及超 C 類(Greater Than Class C, GTCC)爐內組件放射性廢棄物。

(4) 廠區內建立中期貯存廠房(Interim Onsite Storage Building, IOSB)，容納除役產出的 Class B、C 放射性廢棄物。

(5) 保留原辦公室建築以及開關廠(Switch Yard)設施，以供後續規劃興建之發電設施使用。

5.2.2 RPV 爐體輻射特性調查

RPV 爐體及內部組件輻射特性調查基本資料有，Rancho Seco 電廠運轉歷史、爐體及內部組件尺寸、重量、材料等物理特性資料，以及爐內組件(Low Core Support Assembly、Core Baffle Plates and Plenum)實際量測之輻射劑量率。

WMG 公司運用上述實際基本資料及該公司以往之經驗數據(empirical data)，估算爐心內軸向及徑向位置之中子通量，並同爐體監測片(Surveillance capsule)分析結果與現場輻射測量結果，建立每一組件常態活化分析(normalized activation analysis)數據，以完成 Rancho Seco 電廠 RPV 及內部組件之輻射特性調查。然後將其運用到 RPV 及內部組件之細部切割規劃、切割作業 ALARA 輻防規劃、以及廢棄物分類與包裝。

RPV 爐蓋輻射劑量率相當低，已切成 5 塊先移除處置，RPV 爐體如圖 3-1，基本資料如下：

(1) 爐體材料為 SA533，內部不銹鋼 cladding

- (2) 爐體直徑 17.5 英尺(5.33 公尺)、高 32 英尺(9.75 公尺)、爐壁厚度 8.44 英寸(21.4 公分)、內層不銹鋼厚度 0.19 英寸(0.5 公分)，爐體實際重量為 624,400 磅(283,223 公斤)。

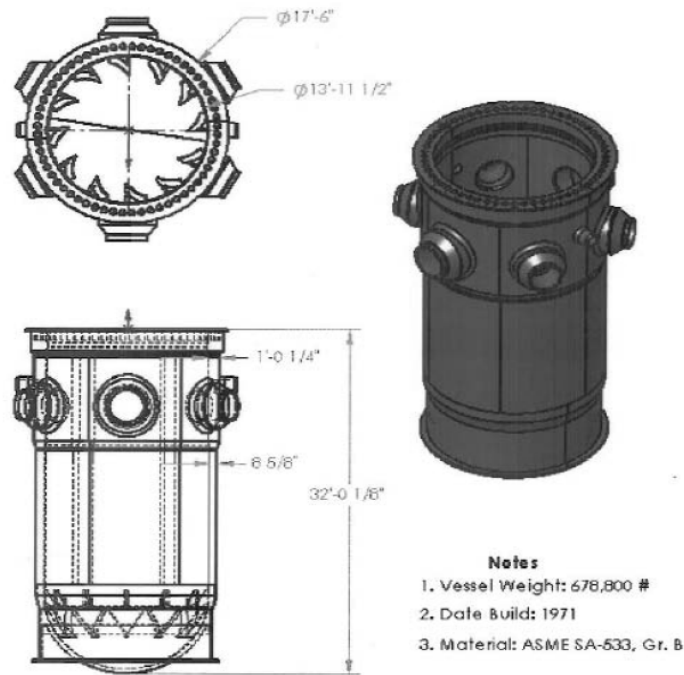


圖 5-1 RPV 爐體

RPV 爐體及爐內組件特性調查結果表列於表 5-2 與表 5-3，文字說明於下；

- (1) 2003/05/01 初始估算總活度為 99,450Ci
- (2) GTCC 活度為 78,500Ci，約占總活度 80%，其中 Co-60 活度約 48,100Ci
- (3) 爐內組件 GTCC 暫存在燃料乾貯場(ISFSI)、Class B、C 暫存在廠內 ISOB。分類為 Class A 廢棄物，包裝後運送到 Clive, Utah 處置場 (EnergySolution 負責營運)。
- (4) RPV 爐體活度約 50Ci(其中 20Ci 活度為 Co-60 貢獻)

(5) 爐體 SA-533 材料總重量約 668,000 磅，總活度約 34Ci(10.4Ci Co-60)

(6) 爐體不銹鋼內襯材料總重量約 11,000 磅，總活度約 15.7Ci(9.1Ci Co-60)

表 5-2 RPV 爐體(SA-533)輻射特性調查結果

Table 2-5
Reactor Vessel Wall Characterization Results

Component: Reactor Vessel Wall			
Component Weight (lb) ^a		6.68E+5	
Total Activity Curies		3.38E+01	
Cobalt Activity Curies		1.04E+01	
Part 61 Table A/B Fraction		<0.01	
Part 61 Table 2 A Fraction		<0.01	
Nuclide	Curies/g	Estimated Curies	Scaling Factor
C 14	3.48E-11	1.05E-02	1.01E-03
Fe 55	6.80E-08	2.06E+01	1.97E+00
Co-60	3.45E-08	1.04E+01	1.00E+00
Ni 59	6.87E-11	2.08E-02	1.99E-03
Ni 63	9.00E-09	2.72E+00	2.61E-05
Nb 94	8.18E-13	2.48E-04	2.37E-05
Tc 99	2.08E-12	6.30E-04	6.03E-05
Totals	1.12E-07	3.38E+01	

表 5-3 RPV 爐體不銹鋼 Cladding 輻射特性調查結果

Table 2-6
Reactor Vessel Wall Characterization Results

Component: Vessel Cladding			
Component Weight (pound ^d)		1.10+04	
Total Activity Curies		1.57+01	
Cobalt Activity Curies		9.09E+00	
Part 61 Table A/B Fraction		0.01	
Part 61 Table 2 A Fraction		0.25	
Nuclide	Curies/g	Estimated Curies	Scaling Factor
C 14	1.27E-09	6.34E-03	1.01E-03
Fe 55	3.53E-07	1.77E+00	1.97E+00
Co-60	1.81E-06	9.09E+00	1.00E+00
Ni 59	7.84E-09	3.93E-02	1.99E-03
Ni 63	9.66E-07	4.84E+00	2.61E-05
Nb 94	1.41E-11	7.08E-05	2.37E-05
Tc 99	2.71E-12	1.36E-05	6.03E-05
Totals	3.14E-06	1.57E+01	

原文此表
Scaling
factor 計算
有誤，應更
正如下

7.02E-04

1.9 E-01

1.00 +0

4.33E-03

5.34E-01

7.79E-06

1.50E-06

5.2.3 RPV 爐體切割計畫評估

RPV 爐體放射性廢棄物特性調查及劑量率評估結果如下：

- (1) 依據 10 CFR 61.55 放射性廢棄物分類原則，確認 RPV 爐體為 Class A 低階放射性廢棄物；另依據 NUREG-1608，切割後 RPV 爐體歸類為第二類低比活度廢棄物 LSA-II (Low-Specific Activity)。
- (2) 2003 年 5 月，因爐內組件尚未移除，爐體實際劑量率仍無法實際測量，但以計算方式評估 RPV 爐體切割後包件可能需求之屏蔽，以符合 49CFR 173.441 運輸規範。
- (3) 爐體腰帶(Beltline)部分平均劑量率評估結果為，碳鋼側距離 12 英吋(30 公分)處平均劑量率約為 580 mrem/hr；不銹鋼 cladding 側距離 12 英吋(30 公分) 處平均劑量率約為 2200 mrem/hr。
- (4) 爐體其他部位平均劑量率評估結果為，碳鋼側距離 12 英吋(30 公分)處平均劑量率約為 32 mrem/hr；不銹鋼 cladding 側距離 12 英吋(30 公分) 處平均劑量率約為 135 mrem/hr。

RPV 爐體放射性廢棄物包裝經評估後，爐體採用大塊切割原則，利用 20 呎貨櫃裝運(除了爐體腰帶部分之外)，爐體切塊在貨櫃內需依據運輸部(DOT)規範做必要的加強固定，必要時在貨櫃內部或外部銲接鋼板做為屏蔽，以符合 49CFR 173.441 運輸規範

爐體腰帶部分切割成 6 塊，分裝在 2 個自行設計、製造的金屬容器內，金屬容器符合 49CFR 173.24、173.24a、410 等法規要求。容器內部須有足夠空間，放入廢棄物後必須澆灌混凝土，以達到固定及屏蔽需求，計算結果顯示，廢棄物四周及上方水泥屏蔽厚度至少需 2 英吋，底部水泥屏蔽厚度需 6 英吋，才能符合運送箱表面接觸劑量率

200mrem/hr，以及 2 公尺外劑量率 10mrem/hr 法規限值。Clive, Utah 處置場另要求，放射性廢棄容器內填滿(fill)比例必須大於 85%。

5.2.4 RPV 爐體切割設備與計劃執行

RPV 爐體切割技術與程序評估準則為，符合輻射防護合理抑低(ALARA)原則、放射性汙染管制避免污染擴散、切割速度與工期規劃、二次廢棄物處理程序、能在爐壁鑿孔(pierce hole)以利爐體切塊吊運、具備經濟效益(Cost Effectiveness)等。經評估各種機械式切割技術與熱切割技術，決定採用磨料水刀技術(Abrasive Water Jet, AWJ)，AWJ 技術優、缺點評估如表 5-4：

表 5-4 磨料水刀(AWJ)技術評估

優點	缺點
可遙控操作，有效減少工作人員暴露	產生混和金屬碎屑與石榴石(Garnet)磨料之二次廢棄物，二次廢棄物之收集與後續除水、乾燥，在現場操作技術上是一個挑戰。
能鑿孔貫穿爐壁	
切割速度快，符合工期要求	
最具經濟效益	

Rancho Seco 電廠選擇 S.A. Robotics 公司負責爐體 AWJ 切割系統設計開發與製造，初步規劃設備必須包含下列要項：

- (1) 電腦、軟體、搖桿、攝影系統等以控制切割位置程序並可確認切割依規劃完成
- (2) 架設在爐穴(Reactor Cavity)樓板環狀軌道上之操作起重台架(gantry)，必須能承載跨爐心橋架以及 AWJ 切割系統，AWJ 噴嘴具 360 度旋轉功能。

- (3) 控制系統操作 AWJ 噴嘴在 RPV 爐體、法蘭、管路噴嘴(Nozzle) 定位
- (4) 石榴石磨料供應系統，配合 AWJ 噴嘴高達 50,000psi 壓力
- (5) 爐心橋架上的支撐桅杆(Mast)，提供 AWJ 系統高壓噴嘴精確定位
- (6) 背板(Backing Plate) 定位在爐壁後面，用以降低石榴石磨料水流壓力，並將其導引到收集系統
- (7) 石榴石磨料收集系統，包含卸料斗(Dump Hopper)、離心機、真空系統等設備，將石榴石磨料與切割碎屑等二次廢棄物，收集到廢棄物桶內。

S.A. Robotics 公司負責範圍包括：設計、製造、測試、安裝、人員訓練，以及提供完成此項工作所需之人力、材料及設備等。

爐體切割設備功能驗證項目包含：

- (1) 完成 RPV 爐體材料(SA-533 Gr.B 內襯不銹鋼)切割功能驗證，材料厚度 5-13 英吋(10-33 公分)，不銹鋼 cladding 厚度 3/16 英吋(0.5 公分)
- (2) 實際切割試驗以確定各種不同厚度之切割速度、系統電源供應需求、AWJ 系統之水及石榴石磨料消耗率
- (3) 驗證確認各種厚度材料切割完成之方法
- (4) 控制面板距離 RPV 爐體中心線 60 英吋 (註：可能是原文錯誤，研判應是是 60 英尺/18.3 公尺)
- (5) 切割精確度(accuracy)：+/-0.25 英吋(0.64 公分)
- (6) 機械臂位置再現性(repeatability)：+/-0.0625 英吋(0.16 公分)
- (7) 在指定的三個位置上完成一定厚度試件之指定的切割路線

(8) 依據切割計畫驗證機械臂移動能力

圖 5-2 為 RPV 爐體切割設備示意圖，主要包含下列組件：

- (1) 爐穴(Reactor Cavity)樓板環狀軌道
- (2) 橋架操作起重台架(gantry)
- (3) 支撐桅杆(Mast)
- (4) AWJ 切割系統
- (5) 石榴石磨料供應系統
- (6) 水刀噴嘴
- (7) 氣壓缸(目的可能是支撐桅杆中心定位並提供強度支撐)

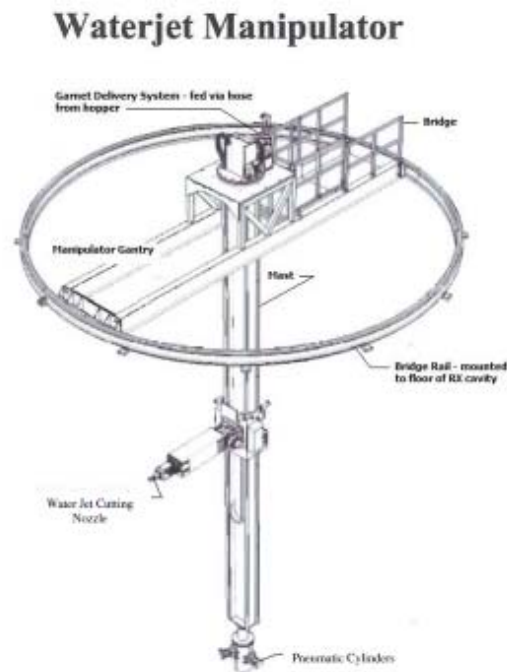


Figure 4-1
Abrasive Water Jet Manipulator

圖 5-2 RPV 爐體切割設備示意圖

爐體切割設備功能補充說明如下，上、下二層橋架同心圓操作起重台架(上層支撐桅杆配備石榴石磨料水流收集系統及攝影系統)、上層支撐桅杆可垂直及水平運動、下層支撐桅杆可以水平及旋轉運動、水刀噴嘴支撐結構可以垂直運動，前臂(forearm)可伸出，水刀噴嘴頭可以旋轉及調整角度。

圖 5-3 及圖 5-4 為 Rancho Seco 電廠 RPV 爐體切割作業實景。

RPV 爐體切割結果示意如圖 3-5，爐體切割件物理數據如表 3-5。文字說明如下：

- (1) RPV 爐體法蘭部位切割成三塊 120°弧型，每塊重量約 11,340 公斤，最高接觸劑量率 250mrem/hr，內表面 30 公分劑量率約 40~50mrem/hr，外表面 30 公分劑量率約 5~10mrem/hr。
- (2) 六塊爐體冷熱端噴嘴部位，每塊重量約 15,150 公斤，最高接觸劑量率 250mrem/hr，內表面 30 公分劑量率約 100mrem/hr，外表面 30 公分劑量率約 15~30mrem/hr。
- (3) 二塊爐體灌水噴嘴部位，每塊重量約 6,123 公斤，最高接觸劑量率 300mrem/hr，內表面 30 公分劑量率約 100~120mrem/hr，外表面 30 公分劑量率約 10mrem/hr。
- (4) 爐體腰帶部位切割成六塊 60°弧型，每塊重量約 15,649 公斤，最高接觸劑量率 2500mrem/hr，內表面 30 公分劑量率約 1000~2000mrem/hr，外表面 30 公分劑量率約 30~50mrem/hr。
- (5) RPV 爐體碗狀下頂蓋周圍(Hemi Head Lower Bowl)切割成三塊，每塊重量約 15,876 公斤，最高接觸劑量率 500mrem/hr，內表面 30 公分劑量率約 100~150mrem/hr，外表面 30 公分劑量率約 10~20mrem/hr。

(6) RPV 爐體碗狀下頂蓋中心(Hemi Head Center Bowl)重量約 4,540 公斤(10,000 磅)。

(7) 所有 RPV 爐體切塊均可確認歸類為 Class A 放射性廢棄物，並符合第二類低比活度(LSA II)廢棄物，運輸可依據聯邦法規 49CFR 173.427(b)(4)相關規範。

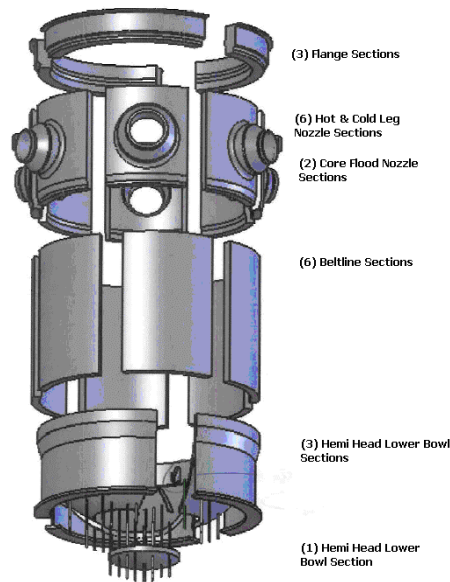
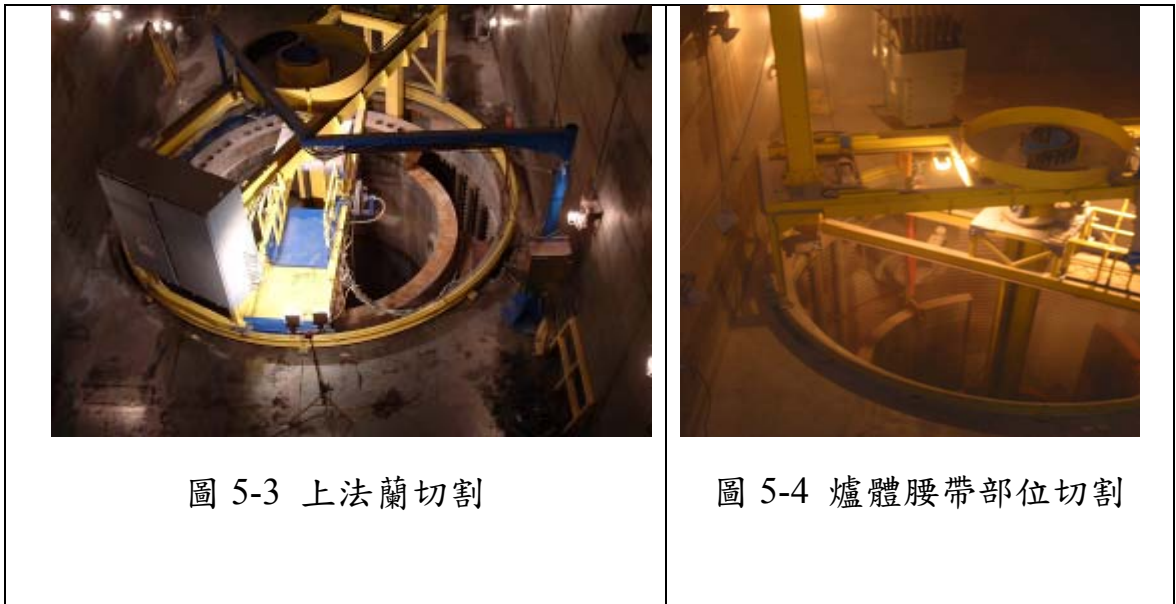


圖 5-5 RPV 爐體切割結果示意

表 5-5 爐體切割件物理數據

Table 5-1
Reactor Vessel Sections Physical Data

Section	Number of Segmented Pieces	Section Weight (lbs) ^a	Density Volume (@ 500 lbs/ft ³) ^b	Total Weight (lbs) As Shipped
Flange	3	25000 lbs	50 ft ³	75000 lbs
Cold Leg Nozzle	4	33400 lbs	66.8 ft ³	133600 lbs
Hot Leg Nozzle	2	33400 lbs	66.8 ft ³	66800 lbs
Core Flood Nozzles	2	13500 lbs	27 ft ³	27000 lbs
Beltline	6	34500 lbs	69 ft ³	207000 lbs
Hemi Head Lower Bowl	3	35000 lbs	70 ft ³	105000 lbs
Hemi Head Center Bowl	1	10000 lbs	20 ft ³	10000 lbs
Totals	21			624400 lbs

現場切割作業執行後發現廢棄石榴石磨料切割後之碎屑顆粒遠小於測試時，導至原設計收集系統無法有效運作(測試階段切割試件厚度為 3 英吋，實際切割厚度 9~11 英吋)，二次廢料收集系統須更新改善，將石榴石與水混和物導入沉澱槽(Weir Settling Tank)，加入 Polyelectrolyte(聚酯)加速石榴石粉末沉澱。廢水經過濾器及 Cs-137 高選擇性除礦處理。石榴石磨料二次廢棄物總重量約 18144 公斤，接觸劑量率約 15-20mrem/hr。二次廢棄物箱(waste boxes)需要相當長時間才能達到適當乾燥度(adequately dry)，廢棄物箱運送到 IOSB 廠房，利用大型加熱器使潮濕的石榴石磨料充分乾燥。

依據報告中數據估算，平均每 1 分鐘切割斷面積約 1.5 平方英吋 (in²/min)，平均每 1 平方英吋切割斷面積需消耗 1 磅石榴石磨料。(註：切割厚度(in) X 平均切割速度(in/min) = 每分鐘平均切割斷面積 (in²/min))

5.2.5 RPV 爐體切割件廢棄物包裝與運輸

爐體腰帶部位切割件因其具備較高輻射劑量率，以特殊設計之廢棄物容器裝載，再利用特殊多軸台車運送到處置場。爐體腰帶部位切割件整體吊運、裝載、運輸，利用實景圖片，配合文字說明彙整於表 5-6 中。

表 5-6 爐體腰帶部位切割件廢棄物包裝與運輸

	<p>利用上端水刀鑿穿孔垂直吊運。</p>
	<p>翻轉將不銹鋼cladding側朝下(因其劑量率較高)，水平放置在枕木上，以利後續裝箱吊運。</p>



廠房內水平裝載進入特殊設計之廢棄物容器內，爐體腰帶部位切割件共6大片，以二個特製容器裝載。



運出反應器廠房，廢棄物容器內澆灌混凝土。灌漿前測量容器表面接觸劑量率，底部最高劑量率1000mrem/hr，容器側面最高劑量率300 mrem/hr，灌漿後分別降低為60及9 mrem/hr。左圖上方中間為混凝土灌漿設備。



二個特製容器安裝固定在多軸台車運輸

除了爐體腰帶部位之外，RPV 爐體其他部位切割後表面都必須塗上特殊油漆(PBS, Bartlett modified acrylic polymer barrier system paint)，以

固定表面污染，確保在電廠內及處置場之吊運作業，無污染擴散之虞(如圖 5-6)，切割件吊運入上開式 20 呎貨櫃，固定後運輸到處置場。



圖 5-6 RPV 爐體其他部位切割件廢棄物包裝與運輸

結論與經驗回饋

- (1) RPV 爐體切割重要里程碑彙整如表 5-7，從設備進廠到計劃完成歷時約 9 個月，從計畫經費、輻防合理抑低及安全各方面而言，計畫是成功的。

表 5-7 RPV 爐體切割重要里程碑

工作內容	時間
設備製造測試完成運送到電廠	2006年5月
設備接收	2006年6月
設備現場組裝、訓練	2006年6~7月
2個灌水管嘴管路切割	2006年7月
法蘭切割	2006年8-9月
8塊有噴嘴爐體切割	2006年9-10月
腰帶部位切割	2006年10-11月
爐體碗狀下頂蓋切割	2006年底
切割完成，設備視同廢棄物處理	2007年2月22日

- (2) RPV 爐體切割總經費約 510 萬美元(US\$5,100,000)
- (3) 總工作人員輻射暴露：15.1 rem
- (4) 總計劃時程非常接近原規劃
- (5) 計劃有利因素有：電廠運轉時間有限，經過長時間(17 年)衰減，輻射源總量較低、從其他除役電廠獲取經驗回饋、包商選擇正確，組成最佳工作團隊。
- (6) AWJ 切割系統提供切割計畫中切割精確度的要求，可應用其他電廠除役之爐內組件切割及 RPV 爐體切割
- (7) 石榴石廢棄物顆粒大小與切割厚度相關，為直接影響二次廢棄物收集、處理系統之功能設計參數。

- (8) 本報告 AWJ 系統應用於爐體各部位不同材料厚度之實際切割長度、平均速度、耗費時間、供給水量、石榴石消耗速率等實際經驗數據相當詳細完整，應可作為選擇 AWJ 切割技術應用於核能電廠除役之類似工程，所產生之二次廢棄物數量估算基礎。

6 大型桶槽拆除

6.1 簡介

本章節主要是參考「Decommissioning Technology Experience Reports, EPRI, Palo Alto, CA:2000, 1000884」研究報告第四部分，內容主要是敘述 Trojan 與 Rancho Seco Trojan 電廠員工發展之技術，引進新穎的吊掛方式，可容許桶槽或容器採取由下而上的拆解方式，並採用多種切割技術與除污及輻防管制合理抑低之作業方法。

Rancho Seco 電廠員工與 TRI TOOL 公司合作開發桶槽圓周及縱切機具，將大型桶槽或容器切割成可吊運、裝箱處理的尺寸大小、重量。相對於以電漿火鋸切割技術而言，此切割機具在處理不銹鋼及有防銹塗漆的桶槽或容器時，可大量降低空浮或有毒性氣體的產生。

大型桶槽拆除時必須考量之複雜因素如下：

- (1) 空間限制(進入路徑、與周邊結構物空間)
- (2) 內部污染(可能需要先除污並採取塗漆等污染固著方式)
- (3) 位置(廠房外、廠房內)
- (4) 尺寸大小(高度、直徑)
- (5) 桶體厚度、材料(切割工法選擇與限制)
- (6) 其他有毒物質(如含鉛油漆必須先去除，或將限制切割方式)

以下簡述報告中除役電廠經驗

6.2 Trojan 電廠經驗：

- (1) 硼酸儲存槽 Boric Acid Storage Tanks (BASTs)拆除

桶槽概述：

- (a) 高：34 feet 9 inches；直徑：12 feet；總重：36,000 lb
- (b) 材料：1/2-in.-thick 不銹鋼板
- (c) 包溫包護材料 Coating —Insulated with fiberglass with a sheet metal jacket(金屬包覆玻璃纖維保溫材料)
- (d) 附屬結構 Attachments —Welded to a 1/2-in.-thick carbon steel diaphragm plate which was painted with lead-based paint

拆除工法與技術：

- (a) 利用絞盤及支撐架建立吊掛支架，由下往上切割拆除。
 - (b) 磁力底盤鑽台，整圈將 Attachments 鑽 4 吋孔與桶身脫離，避免鉛油漆空氣污染。
 - (c) 真空吸盤吊運切塊。
 - (d) 內部塗漆 (latex paint product) 固定鬆散污染。
 - (e) 建立移動式 HEPA (high-efficiency particulate air) 通風系統
 - (f) 電漿切割。
 - (g) 桶槽底部切割與桶身分離後，留在原地，承接切割碎屑
 - (h) 切割尺寸：3 英尺*5 英尺，放入 4 英尺*6 英尺 LSA (low specific activity waste box)
- (2) 化學容積控制系統維持槽 CVCS Holdup Tanks (HUTs)

桶槽概述：

- (a) 高：40 feet 6 inches；直徑：18 feet；總重：32,000 lb
- (b) 材料：3/16 to 1/4-in.-thick 不銹鋼板
- (c) 高污染、高劑量 (30-50 mr/hr general area).

除污、拆除工法與技術：

- (a) 先執行化學除污降低污染具輻射劑量率，採用 EPRI Decontamination-for-Decommissioning (DfD)方法化學除污。
- (b) 底部預估除污係數 15，實際除污係數約為 3.5，除污後容許人員進入桶內工作。
- (c) 內部塗漆(latex paint product)固定鬆散污染，建立 HEPA 通風系統。
- (d) 利用絞盤及支撐架建立吊掛支架，由下往上切割拆除(bottom-up) ，每次高度約 5 英尺。
- (e) 桶底因較高劑量率，切割後優先移除，桶身劑量低，後續工作作業區背景劑量極低(low- or no-dose)。
- (f) 上述切割拆除作業規劃，人員暴露劑量比原始估算減少 23 人-侖目 (person-rem)

(3) 硼液注入槽 Boron Injection Tank (BIT) (圖 6-1)

桶槽概述：

- (a) 高：13 feet 10 inches；直徑： 4 feet 8 inches；總重： 28,500 lb
- (b) 材料：桶身 4-in 碳鋼；上蓋 2-in 碳鋼；內襯 1/8-in 不銹鋼 cladding
- (c) 高污染
- (d) 除污、拆除工法與技術：
- (e) 採用 oxy-propane (氧氣-丙烷)火炬切割，產生較少煙塵，氣體鋼瓶在清潔區，工作人員須穿著防火工作服(沒提到必須先除漆)
- (f) 由上而下切割，每片重達 1500 lb
- (g) 內部塗漆固定鬆散污染，HEPA 通風系統由桶槽上方抽氣



圖 6-1 由上往下切割，採用火炬切割

(4) 一次側爐水儲存槽 Primary Water Storage Tank(圖 6-2)

桶槽概述：

- (a) 高：42 feet 8 inches，直徑：30 feet，總重： 32,000 lb
- (b) 材料：3/16-in.-thick 不銹鋼板
- (c) 位於廠房外
- (d) 輕微污染，但污水含高濃度氫

拆除工法與技術：

- (a) 建立吊架，四週以鋼索拉到圍阻體廠房切割後的大型水泥塊做為結構支撐
- (b) 塑膠布搭建 8 英尺高負壓帳篷
- (c) 電漿切割(plasma)，切片尺寸 2 英尺*2 英尺
- (d) “bottom-up”由下而上切割作業方式，切割高度設定為 4 英尺，完成後，將桶槽高度降低



圖 6-2 一次側爐水儲存槽拆除作業

(5) 燃料裝填水儲存槽 Refueling Water Storage Tank (RWST) (圖 6-3)

桶槽概述：

- (a) 高：46 feet 7 inches；直徑：44 feet；總重：75,200 lb
- (b) 材料：3/16 to 1/4-in.-thick 不銹鋼板
- (c) 桶槽底部嚴重污染有較高劑量率(~mr/hr outside the tank)

除污、拆除工法與技術：

- (a) 底部高壓水沖洗，循環過濾，降低劑量率，桶底最後切除
- (b) 桶身由下往上切除，建立吊掛支架

- (c) 地面建立隔離帳篷，桶身安裝 10 英尺高伸縮帳篷，在帳篷內地面作業，桶身低於 10 英尺，伸縮帳篷上面覆蓋塑膠網再以塑膠布覆蓋
- (d) 帳篷內必須維持負壓，排風經 HEPA 後導入圍阻體廠房內。
- (e) 電漿切割(plasma)，切割高度設定為 4 英尺，完成後，將桶槽高度降低，桶底墊高後切割。



圖 6-3 燃料裝填水儲存槽拆除作業

- (6) 氫氧化鈉槽 sodium hydroxide tank
 - (a) 材料：碳鋼板塑膠內襯(carbon steel with a plastic internal lining)
 - (b) 放棄火焰切割技術，採用氣動切割工具(air-powered nibbler)

6.3 Rancho Seco 電廠經驗

- (1) 高溫切割(Thermal cutting)，如電漿、氧-乙炔，為成熟技術，優點為切割速度快、設備價格低，供應商穩定，缺點為可能造成空浮、火災危害、且必須使用高壓鋼瓶。

(2) 低溫切割(Cold cutting) ，如研磨、鋸切、特殊設計切割機械等，亦為成熟技術，優點為較無空浮疑慮、無火災危害、可遙控操作，缺點為架設時間長、設備昂貴。

Rancho Seco 電廠蒸氣系統管路為碳鋼管，管外塗含鉛油漆，切割作業大部分採用手提鋸(hand-held saws)，少部分採用高溫切割，但須先移除油漆，Rancho Seco 經驗顯示，低溫切割方式經驗證可以符合鉛容許暴露限值，管路低溫切割最具經濟效益。

Rancho Seco 委託 TRI TOOL INC.公司開發桶槽切割技術，基於下列優點採用低溫切割技術

- Cold cutting 不會使桶槽內部污染物擴散出來
- Cold cutting 不需要事先清除桶槽外部含鉛油漆
- 切割不鏽鋼桶槽不會產生有毒氣體

在 Rancho Seco 以機械式切割之桶槽有汽機潤滑油槽(turbine lube oil tank.)，以及硼酸濃縮槽(Boric Acid Concentrator Tank)，切割拆除作業分別簡述於下。

(1) 汽機潤滑油槽：1997 年設計管路圓周切割機(Orbital Pipe Cutter, OPC) (圖 6-4)，切割桶槽直徑可達 12 英尺，但此系統只能做圓周方向切割，無法執行軸向切割，必須再開發其他系統才能完成切塊處置。



圖 6-4 管路圓周切割機

- (2) 硼酸濃縮槽：桶槽直徑 7 英尺，1999 年開發桶槽縱切鋸(Vessel Slitting Saw) (圖 6-5)，搭配前述圓周切割機(OPC)，但桶身縱切每 3-4 英尺必須保留 2 吋寬度，以維持桶槽結構強度。



圖 6-5 桶槽縱切鋸

切割拆除作業期間發現下列問題：

- (a) 支撐架(Strong Back)與線性軸桿彎曲變形
- (b) 切割頭支撐軸承無法反應切割力量

(c) 在支撐架中間增加銲接版，導致切割時機器變形

(d) 機器變形與切割工件位移夾住鋸片(saw blade)

改善方法；

(a) 強化結構(改用 8 吋 * 8 吋 厚 1/2 吋 方管做為主結構支撐)。

(b) 採用鳩尾滑塊(Dovetail slides)與可調整楔型塊做為主要平台，以供軸向運動與切割深度控制。

(c) 調整主變速箱與其棚架位置盡量靠近鳩尾滑塊以提供額外結構剛性。

(d) 伺服進刀系統增設 3：1 減速箱，增設氣壓驅動系統，使切割速度最佳化。

(e) 設計臨時模板，在安裝鋸片前完成加強版銲接，事先完成多處切割位置準備。

(f) 選用可以再磨尖(re-sharpened)、脆性較低(韌性較高)、且可耐受夾住時負荷的鋸片。

Rancho Seco 大型桶槽切割經驗回饋

● 第二代(Orbital Pipe Cutter + Vertical Slitting Saw)切割機成功的應用在硼酸濃縮槽的切割除役，桶槽切割後的切片大小，可以吊運裝箱處置。

● 將應用於其他桶槽。

● 切割系統成功開發，必須倚賴使用者與設備開發商密切合作。

● 電廠大型桶槽或容器除役拆解技術之創新應用。

7 結論與建議

本報告綜整 Dismantling Techniques, Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice, Experience and Know-how, Final Report, June 2009、Decommissioning Technology Experience Reports, EPRI, Palo Alto, CA:2000, 1000884、Rancho Seco Reactor Vessel Segmentation Experience Report, EPRI 1015501, 2008.、Decommissioning: Reactor Pressure Vessel Internals Segmentation, EPRI 1003029, 2001.、. Reactor Internals Segmentation Experience Report: Detailed Experiences 1993—2006, EPRI 1015122, 2007.、The Management of Large Components from Decommissioning to Storage and Disposal, OECD NEA/RWM/R September 2012, 共 6 篇報告, 以下分別以四個面向探討。

7.1 大型組件拆除方式

廣義的拆除作業其範圍包括：組件和結構的去污/移除、廢棄物包裝、包裝物運送，及在受管制的處置設施中進行處置。因此拆除方式及技術的選用，不僅需考上述各項作業技術本身的影響，各項作業相關的法規、公眾的參與等皆需納入考量。

在大型組件拆除管理中，大型組件選擇合適的拆除方式的主要驅動力，主要是：

- 國家解除管制（或分類）和回收策略；
- 處理設施、廢棄物貯存設施，能容納大型組件的可用性；
- 處置設施容納大型組件的能力；
- 運輸的可行性；

- 經濟問題，包括成本效益分析，
- 足夠的拆解程序/工具的可用性。

應發展整體最佳化，解決所有關鍵因素（風險/效益分析）。此報告提出了框格，以評估所有廢棄物管理階段和比較不同的可用選項。框格的結果包括每個階段的具體問題，根據框格，可以進行比較的不同的可能的備選方案（即，切割或單一組件移除、貯存或處置），藉以選擇合適大型組件的拆除方式。

7.2 拆除技術

在規劃拆除作業時，應採用相反的順序進行。也就是先確定廢棄物物流（waste streams）的特性之後，接著就是聯繫未來處置廢棄物的設施，探詢和瞭解廢棄物的接收標準，包括可接受的包裝形式及其內含放射性強度（貝克活度和劑量），包裝尺寸和重量要求，以及相關文書作業。如果廢棄物形式或內容不被該設施所接受，則必須採取替代方案。當包裝尺寸、重量和放射性等限制已決定，就可以確定運輸模式和運送數量（如卡車、鐵路或駁船）。

計劃人員須配合包裝的形式，對於管路、設備和結構等物件，選擇最符合成本效益的切割技術。對於每種可能的技術評估其切割/移除率（噸/天），以決定每天或每週的貨運量，進而設定的總體進度。若有其他技術的經證實可提高產量，則隨時進行調整。

可使用手動或遙控操作的設備執行這些技術，技術的選用則必須加以評估：

- 切割速度，牽涉工作人員在輻射環境下可能遭受的暴露；
- 維護頻率，在擁擠狹窄區域的可接近性將受到限制；

- 粉塵散佈，可能造成污染擴散；
- 二次廢棄物的產生；
- 嚴格的吊裝要求；
- 高空作業的工業安全問題。

經過多年的工作經驗，這些技術已獲得了有效地處理這些問題的方法，而且計畫間彼此分享經驗可提高效能。

新技術往往意味著舊程序及可用設備的改變。以遙控操作為例，當遙控操作增加時，將增進工作安全和減少操作危險物質的風險。使用遙控技術的時機並不僅限於廢棄物的移除，對於其他方面的機械操作也是有幫助的。

一般而言，核設施堅固的主建築結構，可承受外部和內部的危害，但通常由於其建築結構的獨特性，因此並無單一且萬能的方法可以進行拆除和破壞，不過也有一些原則可能會有所幫助。當拆解的工具或設備必須用於狹窄空間時，運輸的機動性和便利性常扮演重要角色。工具的可達範圍也是重要的，例如某些建築的拆除設備可能只能涵蓋兩層樓的工作範圍，但工作範圍較廣闊時，必須使用其他的技術，例如控制性爆破，這方法對於結構的迅速拆除已被證明是有效的。

拆卸的方法分為分解和切割這兩種類型。分解通常是依順序移除扣件與組件，屬於非破壞性的方式（為組裝的反向操作）。切割包括火焰切割、研磨切割及冷切割。火焰切割技術包括氧乙炔和其他氣體火炬、碳電弧火炬、空氣或氧氣電弧火炬、電漿火炬和切割電極，大多數的火炬可以採用遙控或手動方式操作。

研磨切割技術，包括磨床、砂輪鋸、鑽孔機。冷切割技術，包括壓穿式電剪、剪床，及螺栓及大小管件之切割機，可依據不同的應用選擇最佳

的工法。研磨切割技術，包括磨床、砂輪鋸、鑽孔機。冷切割技術，包括壓穿式電剪、剪床，及螺栓及大小管件之切割機，可依據不同的應用選擇最佳的工法。

7.3 反應器內部組件切割

反應器內部的高放射性零組件的移除和最後封存，無論是在技術、計畫管理和人員劑量等各方面都是重大的挑戰。同樣的問題可能出現在國內電廠除役時，唯有參考國外的經驗及教訓，方可提高類似工作成功的可能性。整理出幾點反應器內部組件切割的重點：

- (1) 早期的切割專案選擇電漿為主要的切割方法，近期則是選用磨料水刀，磨料水刀的優點是合理的切割速度、需要的能量較少、不需要廢氣收集系統；缺點是破碎磨料造成的膠狀懸浮不易移除。
- (2) 設備整合性的"高擬真"測試將是絕對關鍵，也就是以全尺寸模型的方式盡可能的複製預期中的現場條件並進行測試。
- (3) 在現場切割工作實施前，應進行廣泛的事前規劃、模擬及測試。
- (4) 若能達到切割次數最小化及切割件尺寸最大化，則二次廢料的產量、人員劑量及成本都將減少。早期的切割專案的 GTCC 密封罐尺寸類似於燃料組件，切割件的尺寸較小；近期則是採用較大密封罐，以達到減少切割次數的目的。
- (5) 切割過程中水質清晰度及切割碎屑的移除是個大挑戰，可靠且易維修的過濾系統是專案成功的關鍵，過濾系統需有足夠大的流量。
- (6) 機械手駕駛台和控制站的設置盡可能地遠離輻射工作區，以避免輻射造成人員劑量的大幅增加。

Rancho Seco 電廠 RPV 爐體除役經驗，相當具備參考價值，以下分別以四個面向探討。

(1) RPV 爐體除役策略

美國除役電廠經驗顯示，將 RPV 爐體視同單一廢棄物包件進行最終處置，為最具經濟效益之方式，Rancho Seco 電廠因其廠址地理位置與南卡羅萊納州 Barnwell 處置場間運輸條件限制，RPV 爐體切割後再運送到處置場為唯一可行方案。國內目前尚無放射性廢棄物永久處置場，處置場廢棄物接收準則尚未確定，且以核一廠為例，RPV 爐體連同外加屏蔽，廢棄物包件外觀尺寸相當可觀，整體重量可能高達千噸，將 RPV 爐體視同單一廢棄物包件進行最終處置，必須克服大型重件吊運技術限制條件、運輸時必須面臨運輸工具及其對應運輸條件限制，如道路、橋樑乘載條件，以及駁船、港口設施是否足夠等因素，都必須預先考量，且若大型放射性廢棄物運輸時，極可能成為社會關注及新聞報導焦點，甚至可能引起電廠與處置場甚至運輸路徑附近居民抗議阻攔。Rancho Seco 電廠爐體切割經驗已驗證 RPV 爐體切割工程技術之可行性，以國內而言，RPV 爐體切割後處置可能是較佳的除役策略。

(2) RPV 爐體切割工法

參考 EPRI 出版相關報告，美國幾個除役之大型核能電廠，反應器爐內組件切割經驗顯示，較為成功的例證大多採用高壓磨料水刀 (Abrasive Water Jet, AWJ) 為主要切割技術工法，如 Connecticut Yankee(PWR-565MWe)、Maine Yankee(PWR-810 Mwe)、San Onofre 1(PWR-463Mwe)等電廠，本報告 Rancho Seco 電廠 RPV 爐體切割，為 AWJ 技術應用另一個成功案例。相較於其他切割工法，如機械式切割、電將切割(plasma)等技術，從目前 EPRI 相關技術報告資料研判，無論從

切割機械設計與維修、輻防管制(空浮議題與工作人員集體劑量)、甚至二次廢棄物處理，AWJ 應具備較為整體的技術優勢。

(3) RPV 爐體切割件容器與輻射防護

參考 EPRI 出版相關報告，RPV 爐體或其切割件應不至於歸類為超 C 類放射性廢棄物(GTCC)。爐體切割件容器為爐體切割計劃之關鍵環節，依據「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」第九條規定，放射性廢棄物處盛裝容器需經主管機關核准後始可使用，盛裝容器之設計、製造、測試、檢驗與其相關核能品保規範，應在電廠停役前即早投入研究能量。

Rancho Seco 電廠累積全功率運轉時間僅有 5.9 年，國內電廠 40 年壽命累積全功率運轉時間保守估算至少為 36 年(以平均功率因素 0.9 估算)，國內電廠 RPV 爐體活化後的輻射劑量率勢必遠高於 Rancho Seco 電廠，本報告中採用大塊切割、直接在空氣中吊運裝入廢棄物容器之處理方式，未必能適用於國內電廠，切割件尺寸選擇、或吊運時採取額外屏蔽，或是切割件在水下裝載進入容器之特殊方式，都是可能之工程選項。建立反應器及其內部組件輻射特性評估與輻射劑量率估算技術，切割計畫之規劃才能完整具備可行性，才能符合 ALARA 輻防管制原則。

(4) 廠區內建立放射性廢棄物中期貯存廠房

美國其他已完成除役之核能電廠，原廠址內僅留存用過燃料貯存場 (ISFSI only)，但 Rancho Seco 電廠在廠區內建立中期貯存廠房(Interim Onsite Storage Building, IOSB)，用以容納除役產出的 Class B、C 放射性廢棄物。在美國核管會官方網站上，Rancho Seco 電廠除役現況加註 Rancho Seco has a low-level waste storage facility in addition to its ISFSI，但仍歸類為完成除役之電廠(請參閱 Fact Sheet on Decommissioning Nuclear Power

Plants , <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/decommissioning.html>)。國內低階放射性廢棄物永久處置場設置困難重重，假設核一廠開始除役後，仍無永久處置場容納運轉與除役產生之廢棄物，在廠區內預先規劃中期貯存廠房，可能是電廠除役策略必須思考的方向。所謂放射性廢棄物延長貯存(extended storage)之觀念與作為，及其衍生的相關技術議題，如法規要求、廢棄物數量估算、長期儲存容器需求等，都必須提前規劃研究。

7.4 大型桶槽拆除

核能電廠在廠房內、外設置大量液體桶槽，切割作業之輻防管制及工法選擇相當重要，Trojan 電廠大型桶槽處理技術與工法，可供國內電廠日後除役之借鏡，其主要工法特色有，高污染高劑量先行除污降低輻射劑量率、桶槽內部以塗漆方式固著污染、建立 HEPA 通風系統以克服空浮問題、採用由下而上切割方式避免高架作業、採用較高效率的高溫切割(如電漿、火焰)技術。Rancho Seco 電廠為避免輻射污染物及含鉛油漆等毒性物質空浮疑慮，桶槽拆除採用低溫切割技術，但是合作廠商必須具備特殊機械機具開發能力。此外，桶槽切割後廢棄物之盛裝容器，如報告中提及的低比活度廢棄物箱(LAS Box)，其呎吋必須先確定，後續才能據以規劃桶槽切割尺寸。

大型桶槽由下而上切除方式，可以減少大量工作鷹架搭建費用，工作人員主要在地面工作，降低作業安全疑慮，且帳篷搭建以及負壓通風系統建立較容易。

視需要先進行桶槽內部除污、建立 HEPA 通風系統、桶槽內部塗漆固著污染、採用效率較高的高溫切割技術，採用由下而上的切割工法，應是大型桶槽除役切割可參考引用之借鏡與原則，但部分特殊有塑膠內襯的桶槽

可能不適用高溫切割作業，則必須先去除其內襯易燃物，或改用低溫機械式切割工法。

桶槽升降控制可以採用多組活動式油壓升降系統取代大型鋼構支架，油壓升降系統應可安全支撐桶槽重量，再配合機械式支撐導引系統，應可滿足工業安全需求，且油壓升降系統可重複應用在不同尺寸桶槽，應可以節省大量經費。

污染廢棄物箱容器尺寸必須先確定，才能據以規劃桶槽切割尺寸。國內目前合法申請之放射性廢棄物容器，可能不適合用於裝載未來除役中大型桶槽切割後之廢棄物，未來核子設施經營者申請除役計畫，規劃桶槽切割尺寸亦需確定符合低放射性廢棄物盛裝容器之法規要求。依據原子能委員會頒布「放射性廢棄物處理貯存及其設施安全管理規則」第九條之規定，放射性廢棄物之盛裝容器需經主管機關核准後始可使用，即使在國外合法使用之合格容器，亦須在國內依法申請審查合格。日後電廠除役作業，放射性廢棄物容器之設計、分析、測試、建製造與執照申請應先行投入研究能量，才能滿足電廠除役需求。

參考文獻

1. GRUCHOW, A., Beitrag zum automatisierten Einsatz thermischer Trennverfahren in der Offshore-Industrie. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 308, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994.
2. BACH, Fr.-W., BIENIA, H., REDEKER, C., VERSEMANN, R., WILK, P., LINDEMAIER, J., Abtrag- und Zerlegetechniken für den Rückbau kerntechnischer Anlagen. atw - Internationale Zeitschrift für Kernenergie, 46. Jg. (2001) Heft 2 - Februar, S. 112-117.
3. HAFERKAMP, H., BOSSE, J., PHILIPP, E. et al., Thermische Prozesse bei der Elektrokontaktbearbeitung unter Wasser. In: 1. CAD-FEM Users' Meeting, Internationale FEM-Technologietage. Friedrichshafen. 20.-22. September 2000.
4. SCHRECK, G., Aspekte zum Rückbau kerntechnischer Anlagen unter Einsatz fernbedienter Unterwasser-Demontagetechniken. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 6 Nr. 406, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1998.
5. PHILIPP, E., BACH, Fr.-W., HAFERKAMP, H., LINDEMAIER, J., CAMC Schneid-, Senk- und Befestigungstechnik, V. Stilllegungskolloquium Hannover, 4. und Statusbericht Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen, 24. und 25. Juni 1997, Unterwassertechnikum Hannover, S. 207-221, 1997.
6. EMMELMANN, C., Introduction to Industrial Laser Material Processing, Rofin-Sinar Laser GmbH, Hamburg, 1998.
7. STEEN, W. M., Laser Material Processing. 2nd edition, Springer Verlag London Limited, London 1998.

8. RZANY, B., Laserstrahlschneiden, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1995.
9. HAFERKAMP, H., GOEDE, M., ROEMER, M. et al., Emissions-Charakterisierung beim Laserstrahlschweißen und Vergleich der Emissions-Mengen beim Laserstrahl- und Plasmaschneiden von Stahl. In: DVS-Berichte, Düsseldorf: DVS-Verl. - ISBN 3-87155-481-2, Band 176 (1996), Seite 59-63.
10. KISTMACHER, H., HAFERKAMP, H., SEEBAUM, D. et al., Einsatzmöglichkeiten des Lasers in der Stilllegungstechnik. In: BMBF (Hrsg.): 5. Stilllegungskolloquium Hannover, 4. Statusbericht Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen, 24.-25. Juni 1997, Hannover, D. 1997, Seite 239-249.
11. SMITH, D., DENNEY, P., Laser Processing of Hazardous Materials. Applied Research Laboratory, Pennsylvania State University, State College, PA 16803; ICALEO, 1993.
12. SCHULZ, H., HAMMER, G., HAMPE, A. et al., Optimierung thermischer Trennverfahren zur Zerlegung kerntechnischer Anlagen, Abschlußbericht, Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH, 1995.
13. HAFERKAMP, H., NIEMEYER, M., DRYGALLA, M. et al., Entwicklung und Optimierung modularer Strahlschneid- und Handhabungssysteme für den kostengünstigsten Rückbau kerntechnischer Anlagen. In: BMBF (PTE) (Hrsg.): VI. Stilllegungskolloquium Hannover/5. Statusbericht Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen, 13.-14. April 2000, Hannover. 2000, Seite 257-267.
14. HAFERKAMP, H., DRYGALLA, M., GOEDE, M., SCHMID, C., Hand-Guided Laser Material Processing. Proceedings of the SheMet International Conference, 17.-19. April 2000, Seite 291 – 300.

15. TÖNSHOFF, H.K., HAFERKAMP, H., GOEDE, M., DRYGALLA, M., SCHMID, C., Hand-guided laser material processing extends the possibilities of users. WGP-Annalen, April 2000.
16. HAFERKAMP, H., GOEDE, M., DRYGALLA, M., Hand-Guided Laser Material Processing: Recent Developments and Safety Aspects. Laser Materials Processing, Vol. 85, Proceedings of ICALEO'98, 1998, 16. – 19. Nov. 1998, Orlando, FL USA.
17. BACH, Fr.-W., LINDEMAIER, J., State-of-the-art of thermal and hydraulical cutting techniques for decommissioning tasks in nuclear industry, Proceedings Waste Management 98, Tucson Arizona, March 1 - 5, 1998.
18. PRINTZ, R.-J., QUADE, U., WAHL, J., Packaging requirements for graphite and carbon from the decommissioning of the AVR in consideration of the German final disposal regulations, IAEA-TECDOC-1043, (Proc. Technical Committee meeting in Jülich, Germany, 1997), pp. 275 – 286.
19. TABOAS, A., MOGHISSI, A.A., LAGUARDIA, T.S., AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ENVIRONMENTAL ENGINEERING DIVISION, et al., The decommissioning handbook, ASME, New York, N.Y. (2004).
20. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities, Technical Reports Series No. 395, IAEA, Vienna (1999).
21. HARADA, M., NAKAMURA, K., YOKOTA, I., NISHI, K., YOKOTA, M., SATO, F., Study on the Technology of Reactor Dismantling by Abrasive Waterjet Cutting System. Proceedings of the 1st JSME/ASME

- Joint International Conference on Nuclear Engineering, Tokyo, 1991, 94-96.
22. BRANDT, C., Anwendung von Wasserabrasivstrahlverfahren zur Zerlegung metallischer Komponenten, Dissertation, University of Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 15 Nr. 216, Düsseldorf, VDI Verlag, 1999.
 23. LOUIS, H., Applied Innovative Dismantling Technique: Waterjet, Proceedings of the Second Workshop Decommissioning of Nuclear Installations Technical Aspects, Doc. XII-217-99, Directorate-General XII, Mol, 1999.
 24. KALWA, H., EICKELPASCH, N., REITER, W., BREHMER, H., BRANDT, C., LOUIS, H., Entwicklung eines umweltverträglichen Zerlegeverfahrens für aktivierte metallische Reaktorkomponenten: Wasserabrasivstrahlverfahren (WASS). Proceedings of the VI. Stilllegungskolloquium Hannover and 5. Statusbericht Stilllegung und Rückbau kerntechnischer Anlagen, Hannover, 20 00, Forschungszentrum Karlsruhe, 225-239.
 25. ALBA, H., BRANDT, C., BREMER, H., EICKELPASCH, N., KALWA, H., LOUIS, H., REITER, W., The Application of Abrasive Water Suspension Jets (AWSJ) for the Dismantling of Nuclear Power Plants, Proceedings of the International Symposium on New Application of Waterjet Technology, Ishinomaki, 1999.
 26. OHLSEN, J., Recycling von Feststoffen beim Wasserabstrahlverfahren, Dissertation, University of Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 15 Nr. 175, Düsseldorf, VDI-Verlag, 1996.

27. Dismantling Techniques, Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice, Experience and Know-how, Final Report, June 2009
28. Decommissioning Technology Experience Reports, EPRI, Palo Alto, CA:2000, 1000884
29. Rancho Seco Reactor Vessel Segmentation Experience Report, EPRI 1015501, 2008.
30. Decommissioning: Reactor Pressure Vessel Internals Segmentation, EPRI 1003029, 2001.
31. Reactor Internals Segmentation Experience Report: Detailed Experiences 1993—2006, EPRI 1015122, 2007.
32. The Management of Large Components from Decommissioning to Storage and Disposal, OECD NEA/RWM/R September 2012
33. 10 CFR 61 “Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Waste” .
34. 10 CFR 71 “Packaging and Transportation of Radioactive Material” .
35. 10 CFR 30 “Rules of General Applicability to Domestic Licensing of Byproduct Material” .
36. 10 CFR 50 “Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities” .
37. 10 CFR 50.59 “Changes, tests and experiments” .
38. 10 CFR 20 “Standards for Protection Against Radiation” .