

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

## 拆除方式技術能力與安全評估研究

計畫編號：103FCMA008

報告編號：103FCMA008-03

執行單位：核能研究所

計畫主持人：張淑君

子項計畫負責人：張淑君

報告作者：吳帝頡

報告日期：中華民國 103 年 12 月

The study of dismantling technologies and safety for the nuclear  
decommissioning

by

Ti-Chieh Wu

Abstract

This report gathers the experience of nuclear facilities dismantling in Europe and the United States, focus on the removal technologies and its limitations of metal materials in different environments (on air or underwater), as well as relevant lesson learn.

The decommissioning of nuclear facilities will encounter the demolition of various metallic equipment, piping and structure, in this paper is to discuss variety of dismantling techniques and procedures which operating performance and limitations. In decommissioning the cutting of the metal can be divided into two major categories of heat cutting and mechanical cutting.

The dismantling of nuclear facilities is implemented not only to comply with the general provisions of industrial safety, but also to consider with spreading of contamination, secondary waste, and the radiation dose of staff. This article provides the introduction of dismantling technical and foundational information, can be used as a reference to the demolition work, according to the assessment of actual situation select the most cost-effective cutting technology.

**Keywords:** dismantling technology, heat cutting, mechanical cutting

# 拆除方式技術能力與安全評估研究

吳帝頡

## 摘 要

本報告蒐集歐洲及美國核設施拆除之經驗，整理金屬材料在不同環境下(空氣中或水中)所採用之拆除方法及其限制，以及相關經驗回饋。

核設施在除役過程中將遭遇各式各樣金屬製之設備、管路及結構物的拆除作業，金屬的拆除切割一般可分為熱切割及機械式切割兩大類。本文主要是探討各種拆除技術及程序的操作性能及限制。

核設施的拆除作業除了要符合一般的工安規定外，在選擇拆除技術時，尚需將污染擴散、二次廢棄物及工作人員的輻射劑量等納入考慮。本文提供各種拆除技術的簡介及基本資料，可作為拆除作業的參考，依據實際狀況進行評估結果，最符合成本效益的切割技術。

關鍵字：拆除技術、熱切割、機械式切割。

核能研究所

## 目錄

1.前言 .....	8
2.金屬的熱切割技術 .....	10
2.1 氧-燃料切割 .....	11
2.2 電漿切割 .....	14
2.3 放電加工 .....	16
3.金屬的冷切割方法 .....	20
3.1 剪切 .....	20
3.2 鋸切 .....	22
3.3 鑽石索鋸 .....	26
3.4 磨削 .....	28
3.5 軌道切割機 .....	29
3.6 銑削 .....	31
3.7 水刀切割技術 .....	32
4.金屬切割技術比較 .....	37
5.遙控拆除技術 .....	42
6. 結論 .....	46

## 圖目錄

圖 1：氧-燃料切割 RPV 頂蓋(KRB-A) .....	12
圖 2：半自動化的氧-燃料切割 RPV 外殼(KRB-A) .....	12
圖 3：氧-燃料火炬切割 RPV(Stade) .....	13
圖 4：氧-燃料火炬切割管路 .....	13
圖 5：氧-燃料火炬切割管路(Trojan) .....	13
圖 6：氧-乙炔火炬現場切割碳鋼結構(IPEN/CNEN-SP) .....	14
圖 7：電漿火炬切割鐵桶吊耳 .....	15
圖 8：電漿火炬切割反應器(MZFR) .....	15
圖 9：電漿火炬切割爐心筒(Yankee Rowe) .....	16
圖 10：電漿火炬切割(Kjeller reprocessing plant, Norway) .....	16
圖 11：CAMC 去除螺栓頭(BR3) .....	17
圖 12：CAMC 去除螺栓示意圖 .....	18
圖 13：CAMC 沿導引裝置切割汽水分離器(KRB-A) .....	18
圖 14：CAMG 切削 RPV 外殼之架構 .....	19
圖 15：固定式液壓剪切機 .....	20
圖 16：攜帶型油壓剪 .....	21
圖 17：攜帶型油壓剪現場作業(Kjeller reprocessing plant) .....	21
圖 18：水下油壓剪切作業(MZFR) .....	21
圖 19：壓穿式電剪拆除切割桶槽(IPEN/CNEN-SP) .....	22
圖 20：帶鋸切割爐心側板(Würgassen) .....	23
圖 21：帶鋸切割噴射泵(Würgassen) .....	23
圖 22：帶鋸切割 RPV 頂部凸緣(Würgassen) .....	23
圖 23：帶鋸機用於 BR3 除役計畫 .....	24
圖 24：鑽石圓盤鋸切削試驗(左)切削前(右)切削後(Tokai 1) .....	24
圖 25：遙控操作的圓盤鋸(Zion) .....	24
圖 26：往復鋸用於 BR3 除役計畫 .....	25
圖 27：開刀往復鋸用於 BR3 除役計畫 .....	25

圖 28：開刀鋸用於加拿大的 Gently-1 .....	25
圖 29：開刀式往復鋸用於模擬測試(Rancho Seco).....	26
圖 30：鑽石索具架設及切割過程.....	26
圖 31：鑽石索具切割反應器噴嘴(San Onofre unit 1) .....	27
圖 32：蒸氣乾燥器灌注水泥後用鑽石索具切割(Würgassen).....	27
圖 33：鑽石索具切割反應器頂蓋(Rancho Seco).....	27
圖 34：鑽石索具切割蒸汽產生器(Rancho Seco).....	28
圖 35：切割用砂輪機.....	28
圖 36：砂輪機現場切割鋼材(IPEN/CNEN-SP) .....	29
圖 37：自動軌道切割機用於輻射區.....	30
圖 38：手動軌道切割機(Ranco Seco) .....	30
圖 39：銑削刀具沿鍊條切斷鋼管.....	31
圖 40：銑削刀具切斷 RPV 噴嘴.....	32
圖 41：(左)磨料注入水刀；(右)磨料懸浮水刀 .....	33
圖 42：VAK 核電廠使用磨料懸浮水刀.....	36
圖 43：攜帶攝影鏡頭的磨料水刀頭(San Onofre 1).....	36
圖 44：比較不同切割工具的切割深度及速度.....	40
圖 45：BWR 反應器壓力槽及其內部組件.....	40
圖 46：機械手測試(MZFR) .....	43
圖 47：RWE NUKEM 為輻射作業開發之機械手 .....	44
圖 48：機械手攜帶水刀噴嘴(Rancho Seco).....	44
圖 49：機械手用於切除 RPV 外部隔熱材料(Stade) .....	45
圖 50：機械手前端安裝各種工具.....	45

## 表目錄

表 1：拆除 VAK KAHL 的水刀切削參數 .....	35
表 2：機械式及熱切割之優缺點 .....	37
表 3：除役常用切割技術之優缺點 .....	38
表 4：各類零組件適用之拆除技術 .....	39
表 5：BWR 反應器壓力槽及其內部組件之拆除規劃 .....	41

## 1.前言

一座典型核設施除役產生的物料，最大宗的顯然是混凝土塊與金屬。本文是針對除役時金屬物料的移除及切割方法進行研究，由於拆除程序的選擇，決定了後續拆除的特性和廢棄物的管理工作，因此考慮各種技術的優缺點，選擇合適的拆除切割技術，對於二次廢棄物數量、工作人員劑量、除役時程及成本將產生正面效益。

本研究將幫助的除役規劃人員針對不同的應用選擇適當的技術。設備或零組件的拆卸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)。切割則分為熱切割及冷切割兩類。

熱切割通常是在不直接接觸工件的情況下進行切割，基本可分為兩種，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)，方法包括：電漿火炬、氧乙炔火炬、放電加工、金屬破碎機…等。

冷切割方法在切割過程中刀具會碰觸工件者，又稱為機械式切割，例如：鋸切、剪切、研磨、鑽石索鋸、…等。而磨料水刀也屬於冷切割的一種，但工作過程中切割刀具並不會碰觸工件。

以切割作業來移除設備或結構時，可以採用手持操作或遙控操作執行拆除，而拆除切割技術的選用需做下列評估：

- 切割效能：影響效能的因素有切削速度、切割深度、可靠性、維護需求、適應性、設備尺寸、設備重量及切割系統佈置。
- 現場狀況：現場的可接近性及障礙物、設備的操控性、現場可提供的資源，以及電廠系統的需求。
- 安全考量：影響安全的因素分為輻射安全及工業安全，輻射安全是考慮輻射劑量、空浮、表面污染及放射性廢棄物產生

等；工業安全是考慮火災、高空墜落及有毒氣體等可能產生工業安全災害。

- 成本考量：影響成本的因素包括投資成本、耗材成本和人力工時需求。

歐美各國經過多年除役工作經驗的累積，對於各種拆除切割技術已獲得了有效地掌握，而且國際間彼此分享經驗以提高效能。

除了一般工業界常用之拆除切割技術及設備外，也加入一些新技術以改善工作條件，而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，當遙控應用技術提升時，將提高工作安全和減少操作危險物質的風險。

本文介紹金屬材料的拆除工法及在國外核設施除役之應用，並整理出各種拆除切割技術之優缺點及適用狀況。由國外的的工作經驗可知，技術的應用須依據個案狀況，並無一體適用的技術，而且通常需要將不同技術予以組合應用。

## 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或高溫火焰。

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，最後使大型組件分離，成為易於搬運的形狀。

根據產生熱量的能源種類，可將熱切割技術予以細分。這些能源包括：

- 化學方法(氧-燃料切割、添加金屬粉末之氧-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)。

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；
- 可長時間工作，因而降低總成本(雖然設備架設和拆卸的時間可能較長)。

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，或稱為氣溶膠(aerosol)或水溶膠(hydrosol)，可能需要大範圍的過濾和管控。

在下面的章節中，將描述一系列常用熱切割技術及其應用案例，其中雷射切割多屬實驗階段，實際的應用案例較少，因此本文並不加以介紹。

## 2.1 氧-燃料切割

氧-燃料(oxy-fuel)切割中所稱的“燃料” 可以是乙炔、丙烷、汽油或其他可燃氣體，切割過程使氧和被切割材料之間出現放熱化學反應。此一切割技術適用於碳鋼(肥粒鋼)材料，在切割過程中燃料火焰提供活化能量，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。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。

氧-燃料切割過程中是以金屬融液輸送熱量，對於常用於反應器壓力容器的雙層材料結構(外殼為碳鋼，內層為不銹鋼)，也可採用氧-燃料切割，但應由外部往內部切割，外部碳鋼的金屬融液攜帶足夠的熱量將內層的不銹鋼熔融。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 Gundremmingen unit A (KRB-A)核電廠。圖 1 為氧-燃料切割 RPV 頂蓋，碳鋼厚度 80 mm 不銹鋼厚度 7mm。

氧-燃料切割鋼板的厚度可達 250mm，如圖 2 所示，氧-燃料火炬頭經由一個軌道系統來移動，進行半自動化的切割，火炬從 RPV 外部向內切，切割進行中採用高效過濾系統來捕捉氣溶膠(aerosol)，對於 131 mm 厚的 RPV 外殼，切割速度可達到 200 mm /min。

圖 3 是德國 Stade 核電廠採用氧-燃料火炬切割 RPV 外殼，係使用機械手臂攜帶火炬執行自動化的切割。此外，氧-燃料火炬可以架設在環繞著鋼管的軌道上進行管路切割(圖 4)。

圖 5 是美國 Trojan 核電廠採用 oxy-propane (氧氣-丙烷)火炬切割硼液注入槽(Boron Injection Tank)，採用丙烷的原因，是切割過程所產生煙塵較少。圖 6 是巴西 IPEN/CNEN-SP 核燃料設施的除役現場，使用氧-乙炔火炬切割碳鋼結構。

氧-燃料切割的優點是切割速度高，設備的價格低廉，可切割厚鋼板，實驗中的氧-燃料切割可厚達 320mm 的鋼板，其缺點是切割過程中會產生大量的氣溶膠。



圖 1：氧-燃料切割 RPV 頂蓋(KRB-A)



圖 2：半自動化的氧-燃料切割 RPV 外殼(KRB-A)

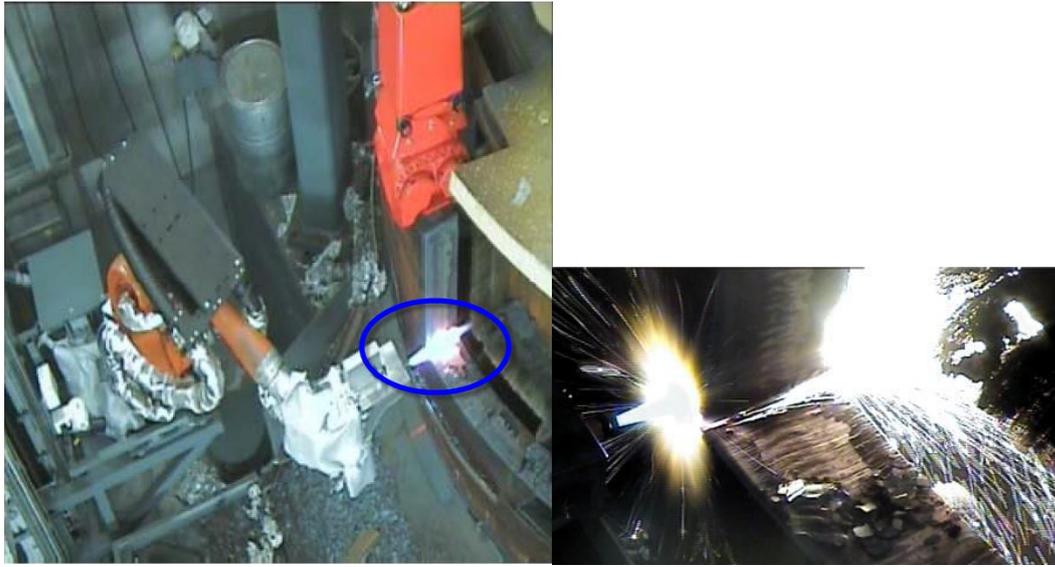


圖 3：氧-燃料火炬切割 RPV(Stade)

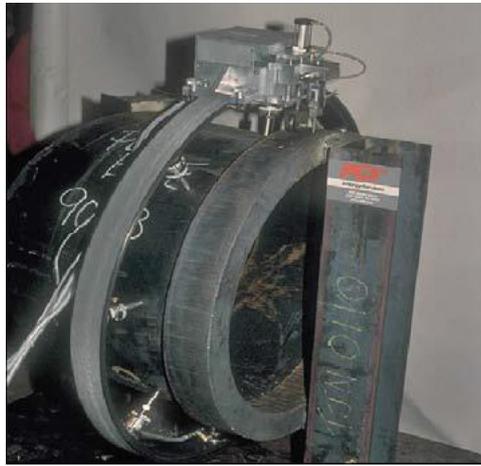


圖 4：氧-燃料火炬切割管路



圖 5：氧-燃料火炬切割桶槽(Trojan)



圖 6：氧-乙炔火炬現場切割碳鋼結構(IPEN/CNEN-SP)

## 2.2 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，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 7 為俄羅斯老式的 EK-10 型用過燃料是儲存在填充混凝土的 200l 鐵桶中，由於送往熱室再處理之前，需要去除鐵桶上的吊耳，因此開發遙控電漿切割的新程序，以減少工作人員的劑量。圖 8 是德國的 Karlsruhe 重水式多功能研究用反應器(MZFR)，使用電漿切割反應器的狀況。圖 9 是美國 Yankee Rowe 核電廠除役使用電漿切割反應器爐心筒(core baffle)，這兩項工作都是在水下執行。圖 10 是挪威的 Kjeller 再處理

廠除役的現場電漿切割作業，在工作人員上方有一個漏斗狀的抽氣入口，用於抽取切割所產生之煙霧。



圖 7：電漿火炬切割鐵桶吊耳

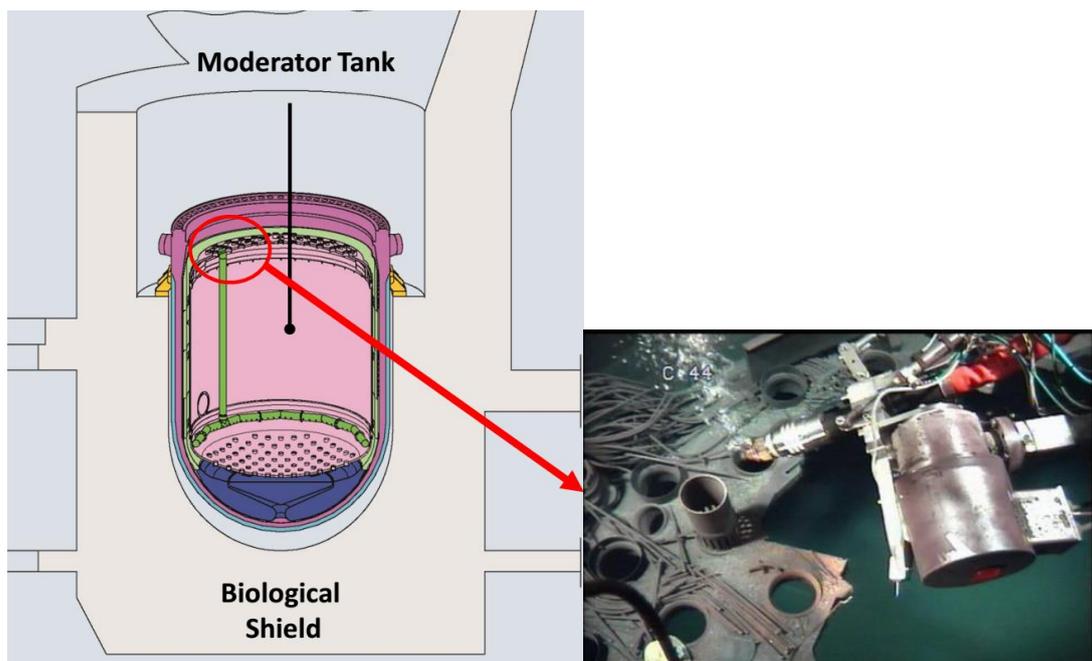


圖 8：電漿火炬切割反應器(MZFR)



圖 9：電漿火炬切割爐心筒(Yankee Rowe)



圖 10：電漿火炬切割(Kjeller reprocessing plant, Norway)

### 2.3 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。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。

### 2.3.1 接觸電弧金屬切割

接觸電弧金屬切削(contact arc metal cutting, CAMC)，又稱為金屬破碎機(metal disintegration machining, MDM)，是以放電加工的原理為基礎，使用金屬或石墨電極，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。

圖 11 所示用於去除螺栓的 MDM，電極通常設計成短棒或劍形(楔形)，如圖 12 所示 MDM 可用於其他工具難以接觸的位置。該技術成功應用於德國 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 13 為 CAMC 切割 KRB-A 的汽水分離器。



圖 11：CAMC 去除螺栓頭(BR3)

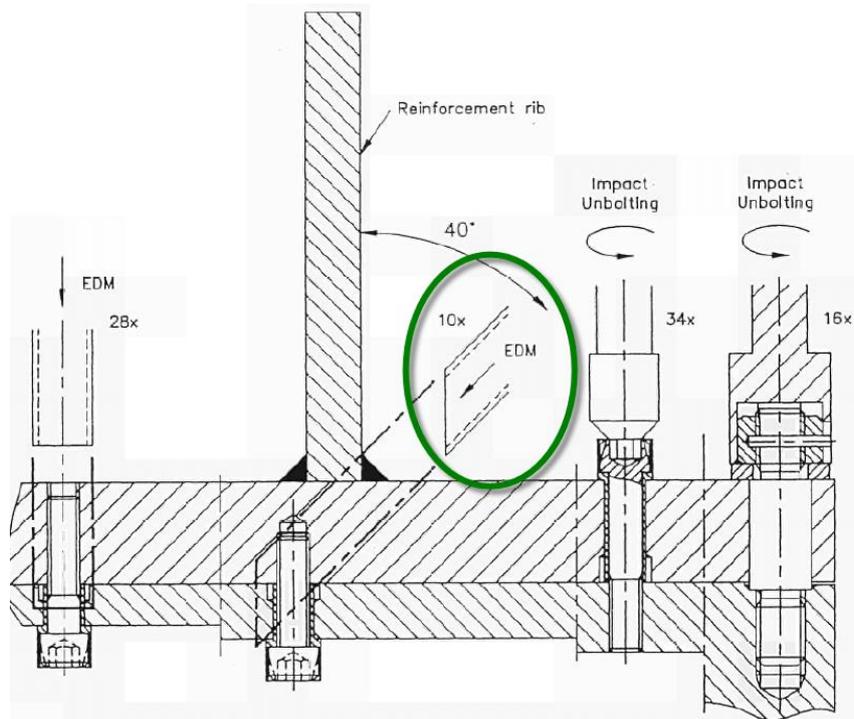


圖 12：CAMC 去除螺栓示意圖

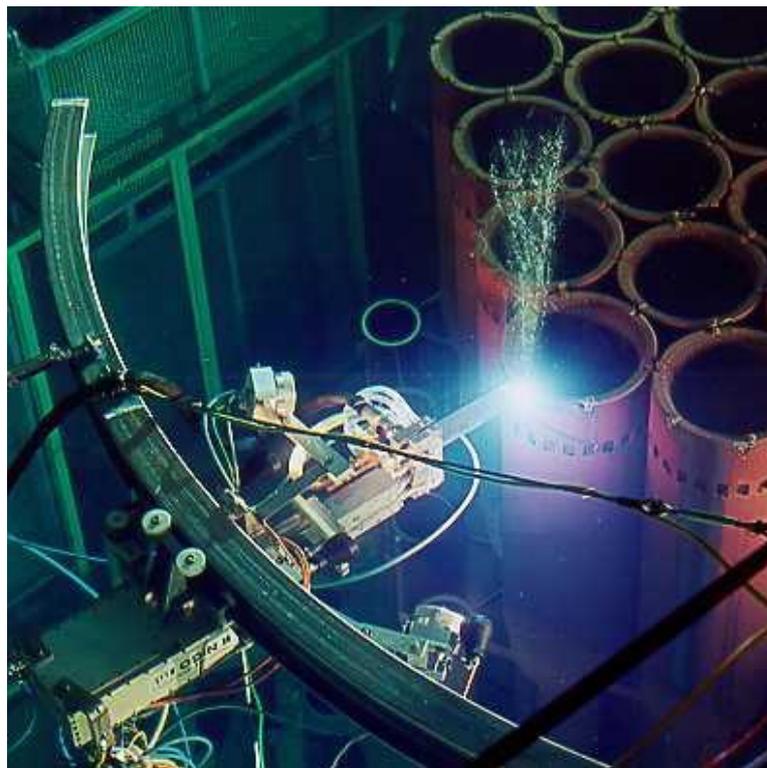


圖 13：CAMC 沿導引裝置切割汽水分離器(KRB-A)

### 2.3.2 接觸電弧金屬研磨

接觸電弧金屬研磨(contact arc metal grinding, CAMG)，又稱為電弧圓盤鋸(arc saw)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 14 是規劃 CAMC 切割 RPV 外殼之示意圖。

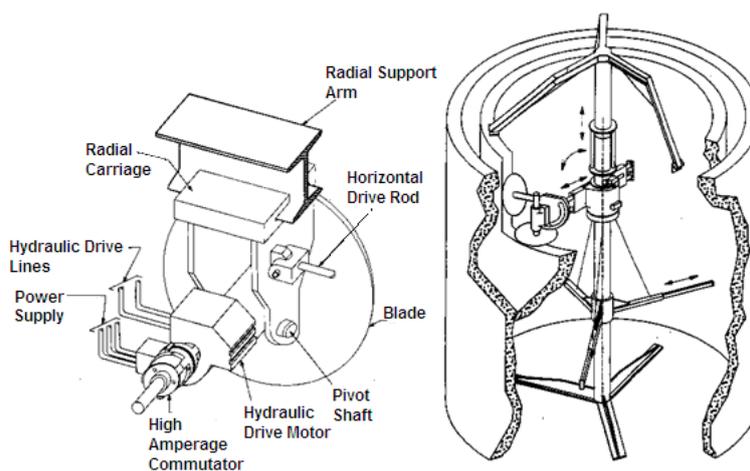


圖 14：CAMG 切削 RPV 外殼之架構

### 3.金屬的冷切割方法

#### 3.1 剪切

依據定義剪切是利用機械力使材料分離，剪切的種類如下：

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

液壓剪依據其尺寸及使用情形，可分為固定式及可攜式兩種，圖 15 為固定式液壓剪切裝置，剪切刀片的長度是 600 mm，最大剪切力量 1550 kN，可以切割材料直徑 50 mm 的圓鋼棒，鋼板厚度 180 mm，可快速剪切且幾乎不產生二次廢棄物。固定式液壓剪切機是將馬達、幫浦、液壓缸及剪切刀片結合成一體。可攜式液壓剪則是將液壓供應系統與剪切系統分離，彼此間以油管相連接，因此液壓供應系統可以放置於空曠區域，而剪切刀片可以由工作人員攜帶至現場(圖 16)，圖 17 為可攜式液壓剪在現場作業狀況，工作地點是挪威的 Kjeller 再處理廠。圖 17 為油壓剪在水下作業的狀況。



圖 15：固定式液壓剪切機



圖 16：攜帶型油壓剪



圖 17：攜帶型油壓剪現場作業(Kjeller reprocessing plant)

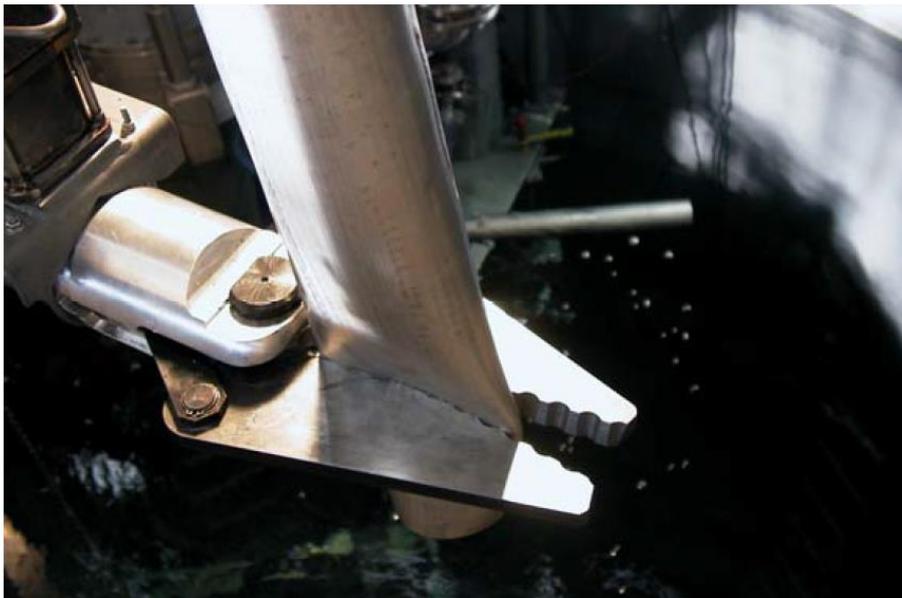


圖 18：水下油壓剪切作業(MZFR)

此外，壓穿式電剪(nibbler)也是屬於剪切工具，它的工作原理是將被切割的材料至於圓形衝頭及圓孔模具之間，藉著衝頭以高速進行往復運動，將材料分離去除達到切割的目的。此一工具的體積小重量輕，適合各種板金材料的切割作業。圖 19 是使用壓穿式電剪切割桶槽。



圖 19：壓穿式電剪拆除切割桶槽(IPEN/CNEN-SP)

### 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。常見的鋸切工具有帶鋸(bandsaw)、圓盤鋸(circular saw or disk cutter)及往復鋸(reciprocating saws)，往復鋸又可細分為弓鋸(hacksaw)及閘刀鋸(guillotine saw)。

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。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 20~23 為帶鋸機的應用實例，圖 24~25 為圓盤鋸的應用實例，圖 26~29 為往復鋸的應用實例。



圖 20：帶鋸切割爐心側板(Würgassen)



圖 21：帶鋸切割噴射泵(Würgassen)



圖 22：帶鋸切割 RPV 頂部凸緣(Würgassen)



圖 23：帶鋸機用於 BR3 除役計畫



圖 24：鑽石圓盤鋸切削試驗(左)切削前(右)切削後(Tokai 1)

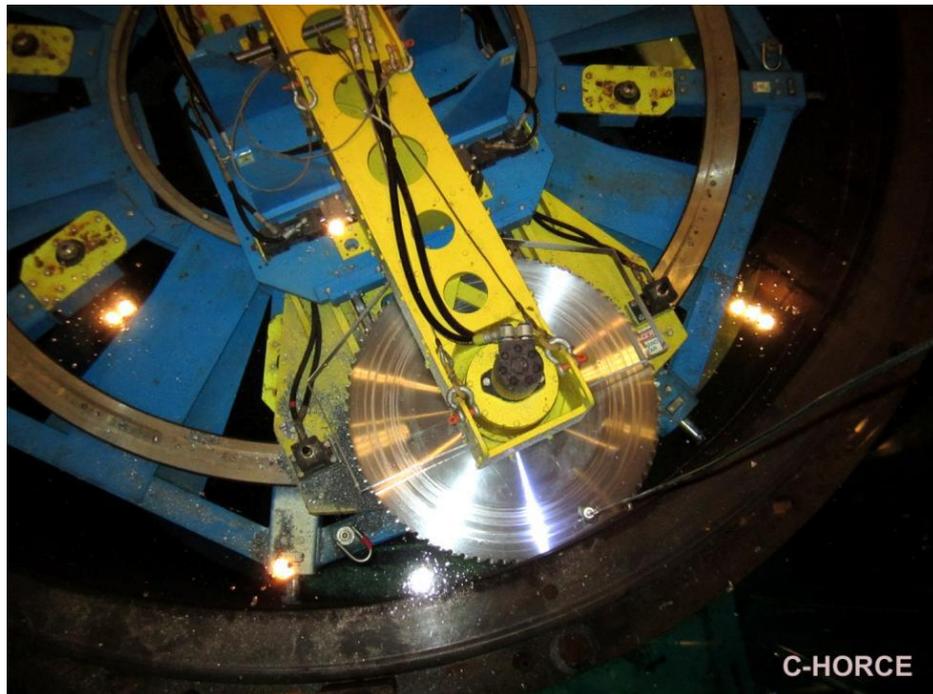


圖 25：遙控操作的圓盤鋸(Zion)



圖 26：往復鋸用於 BR3 除役計畫

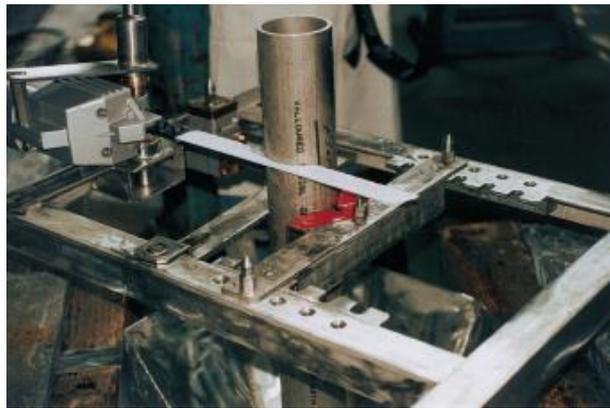


圖 27：開刀往復鋸用於 BR3 除役計畫



圖 28：開刀鋸用於加拿大的 Gently-1



圖 29：開刀式往復鋸用於模擬測試(Rancho Seco)

### 3.3 鑽石索鋸

鑽石索鋸也可視為廣義的鋸切，但其刀刃為鑲在鋼索上的鑽石，通常使用直徑約 11 mm 的鋼索，每一公尺的鋼索上平均分布著約 40 個鑽石環，鑽石環以電鍍或金屬燒結方式與鋼索結合。鑽石環之間的小段鋼索具有彈性，讓整條鑽石索鋸可以彎曲，鋼索利用滾輪導引改變方向，移動鋼索與工件產生摩擦達到切割的目的，一般鑽石索鋸常用於切割混凝土。圖 30~34 為鑽石索鋸的應用實例



圖 30：鑽石索具架設及切割過程



圖 31：鑽石索具切割反應器噴嘴(San Onofre unit 1)



圖 32：蒸氣乾燥器灌注水泥後用鑽石索具切割(Würgassen)

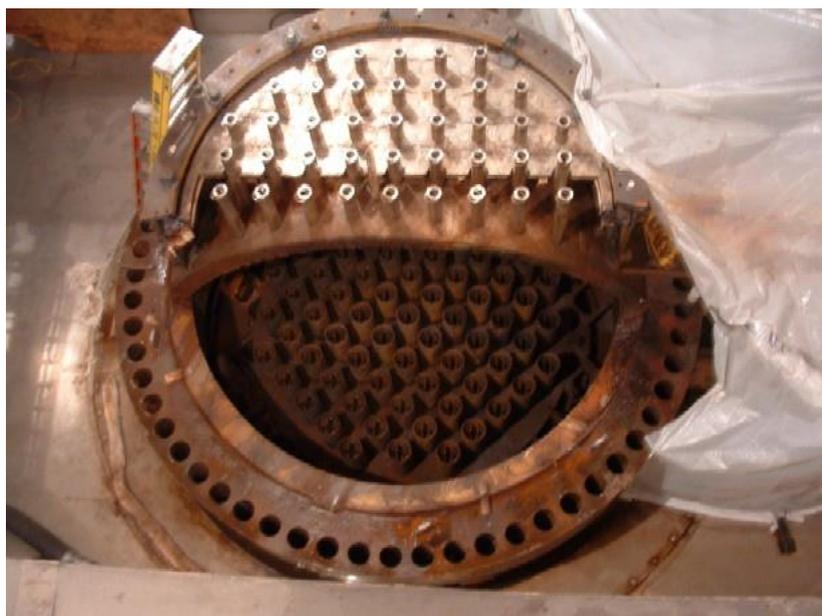


圖 33：鑽石索具切割反應器頂蓋(Rancho Seco)



圖 34：鑽石索具切割蒸汽產生器(Rancho Seco)

### 3.4 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，以及做好切屑的收集。圖 34 為各式切割用砂輪機照片。圖 35 為巴西 IPEN/CNEN-SP 核燃料設施的除役現場砂輪機操作情形。



圖 35：切割用砂輪機



圖 36：砂輪機現場切割鋼材(IPEN/CNEN-SP)

### 3.5 軌道切割機

軌道切割機(Orbital cutters, clam shell cutters)是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。軌道切割機的安装是以軌道環繞被切割之圓柱，刀座架設在軌道上，刀座的行走可以是手動式裝置或自走式單元。刀座在繞行過程中，刀刃不斷深入被切割物，刀刃的進給可能是手動或自動，圖 37 為自動式軌道切割機切斷輻射區鋼管之操作照片。圖 38 為手動式軌道切割機之操作。軌道切割機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。

(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 37：自動軌道切割機用於輻射區



圖 38：手動軌道切割機(Ranco Seco)

### 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。圖 39 所示為銑削刀具沿著環繞鋼管的鍊條前進以切割鋼管。圖 40 所示為 RPV 噴嘴的銑削刀具架設及工作狀況。

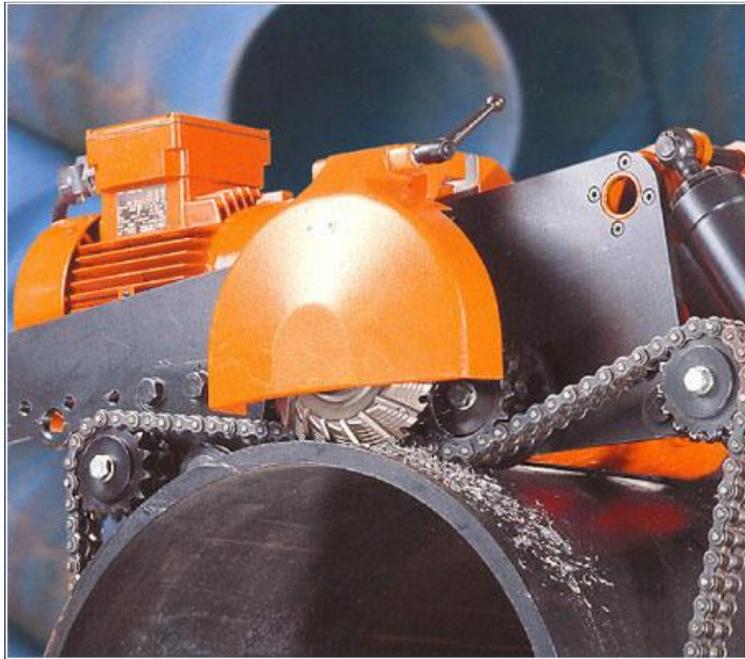


圖 39：銑削刀具沿鍊條切斷鋼管

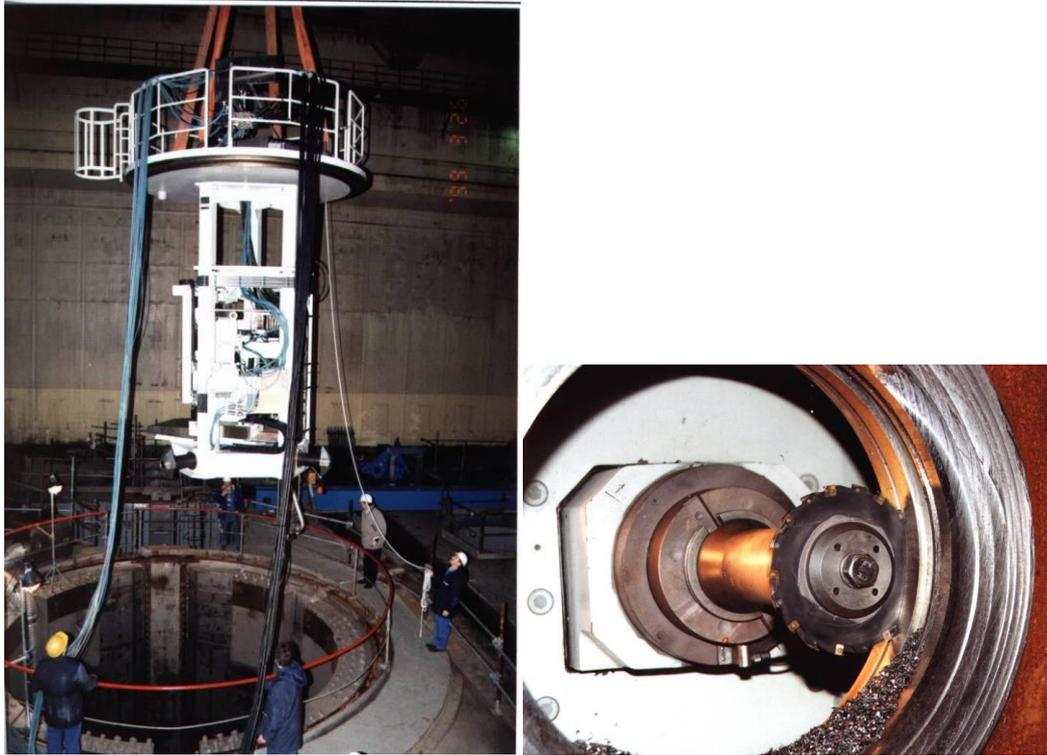


圖 40：銑削刀具切斷 RPV 噴嘴

### 3.7 水刀切割技術

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。

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)，分別採用不同的啣送原理。(圖 41)

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)組件與一個聚焦(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。

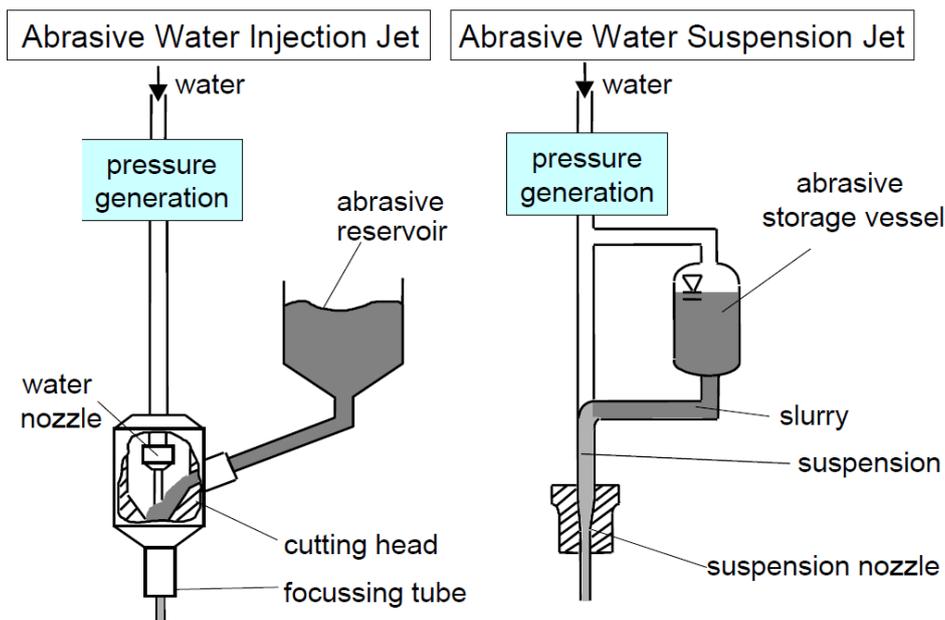


圖 41：(左)磨料注入水刀；(右)磨料懸浮水刀

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。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。

第一個應用磨料水刀的拆除案例子，是日本動力示範反應器 (Japan Power Demonstration Reactor, JPDR) 的生物屏蔽。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)。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  $15^\circ$ 。
- 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  $45^\circ$ ，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(圖 42)。反應器壓力容器的切割則使用 200 MPa 壓力。在表 1 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。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 1：拆除 VAK KAHL 的水刀切削參數

	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

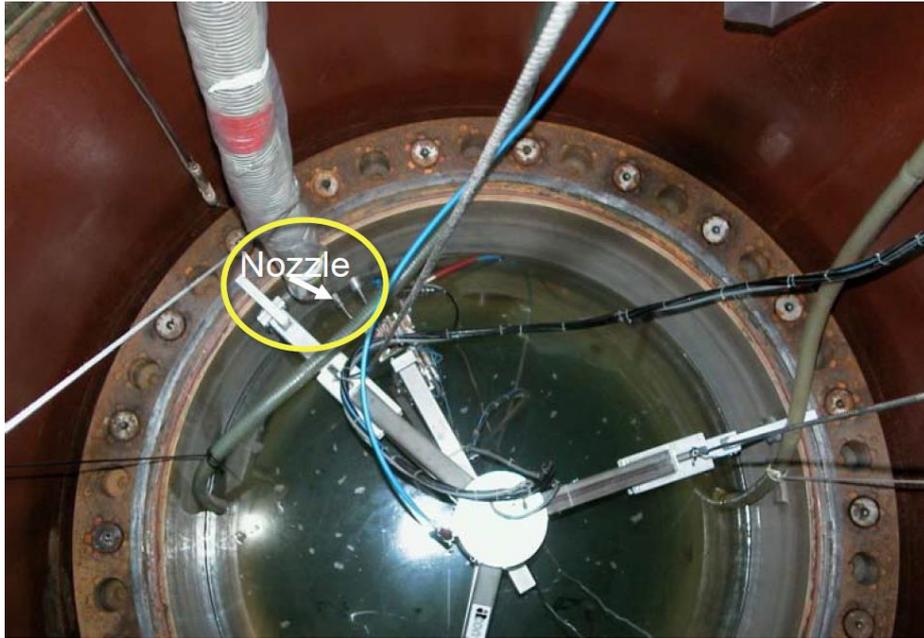


圖 42：VAK 核電廠使用磨料懸浮水刀

在美國使用磨料水刀進行 RPV 及其內部組件切割的核能電廠有 Connecticut Yankee、Maine Yankee 及 San Onofre 1。圖 43 為 San Onofre 1 磨料水刀在水下執行工作之狀況。

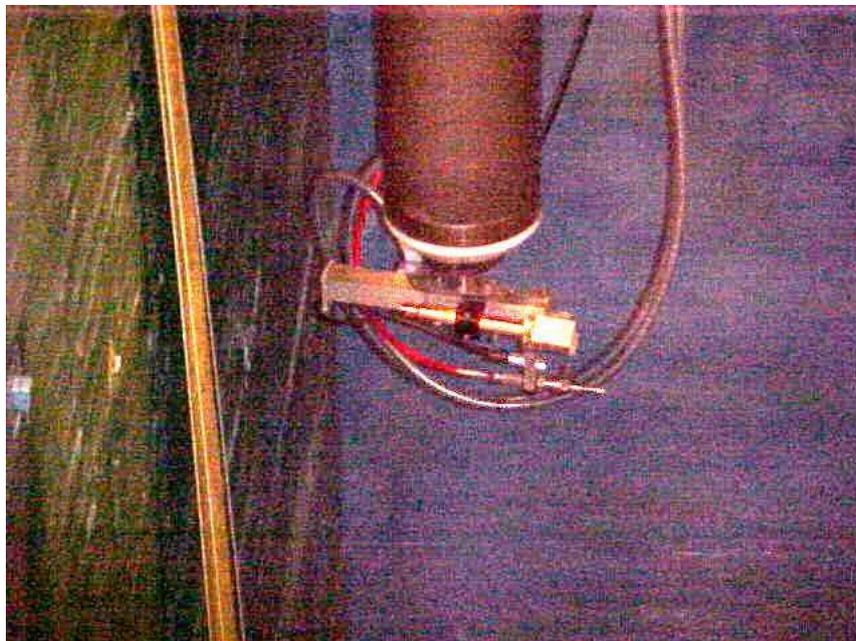


圖 43：攜帶攝影鏡頭的磨料水刀頭(San Onofre 1)

#### 4.金屬切割技術比較

切割則分為熱切割及冷切割兩類，這兩類切割的優缺點概述如表 2。冷切割又可分成機械式切割及磨料水刀切割，兩者的差異在於，機械式切割在切割過程中刀具會碰觸工件者，但磨料水刀在工作過程中切割刀具並不會碰觸工件。

表 3 則是詳列除役常用切割技術之優缺點。表 4 是依據國外經驗，對於不同的零組件可以列出適合採用各種不同之拆除技術。圖 44 是比較不同切割工具(雷射、電漿、磨料水刀及氧-燃料)的切割深度及速度。

表 2：機械式及熱切割之優缺點

	優點	缺點
熱切割	<ul style="list-style-type: none"><li>● 切割速度快</li><li>● 可沿曲線做較有彈性的切割</li><li>● 切割工具小巧靈活</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 切割過程會產生氣溶膠，造成空浮</li><li>● 在空氣中或水中需要設置大流量的過濾系統，收集切割產生之細小顆粒</li><li>● 空氣中或水中的過濾器濾芯都將成為二次廢棄物</li></ul>
機械式切割	<ul style="list-style-type: none"><li>● 切屑顆粒大易收集</li><li>● 無大量熱量輸入，不易造成空浮</li><li>● 二次廢棄物數量少</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>● 切割速度較慢</li><li>● 需要強壯的結構支撐以抵抗切割時的反作用力</li><li>● 狹小空間之活動與近接性較差</li><li>● 不易做曲線軌跡切割</li><li>● 刀具易磨損需定期維護更換</li><li>● 發生故障、刀具破損或刀具卡入切縫等，故障排除耗時</li><li>● 在空氣中使用需要液體的潤滑及冷卻</li></ul>

表 3：除役常用切割技術之優缺點

	優點	缺點
氧-燃料切割	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 同表 2 熱切割優點</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 同表 2 熱切割缺點</li> <li>● 不適合切割不銹鋼</li> </ul>
電漿切割	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 同表 2 熱切割優點</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 同表 2 熱切割缺點</li> </ul>
(液壓)剪切	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 幾乎不產生切屑</li> <li>● 無大量熱量輸入，不易造成空浮</li> <li>● 二次廢棄物數量少</li> <li>● 剪切速度快</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 受物件形狀及尺寸的限制，不適用於直徑太大或太厚的物件</li> <li>● 需要強壯的結構支撐以抵抗切割時的反作用力</li> <li>● 狹小空間之活動與近接性較差</li> <li>● 水下操作發生漏油意外，將造成清理的困難</li> </ul>
鋸切	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 同表 2 機械式切割優點</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 同表 2 機械式切割缺點</li> </ul>
金屬破碎機(放電加工)	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 狹小空間之活動與近接性佳</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 在水中需要過濾系統，收集切割產生之細小顆粒</li> <li>● 切割速度慢</li> <li>● 僅適用於金屬材料</li> </ul>
磨料水刀	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 狹小空間之活動與近接性佳</li> <li>● 無大量熱量輸入，不易造成空浮</li> <li>● 可沿曲線做較有彈性的切割</li> <li>● 切割時無反作用力，結構支撐相對簡化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 用過的磨料成為二次廢棄物</li> <li>● 在水中需要需要設置大流量的過濾系統，收集切割造成之細小顆粒</li> <li>● 過濾器濾芯將成為二次廢棄物</li> </ul>
鑽石索鋸	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 狹小空間之活動與近接性佳</li> <li>● 切屑顆粒大易收集</li> <li>● 適合水下作業(不需額外潤滑及冷卻)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 機具的安裝架設較耗時</li> <li>● 切割速度慢</li> <li>● 受限於鑽石繩索的彎曲半徑，適用大型切割件</li> <li>● 在空氣中使用需要水的潤滑、冷卻及沖洗切割位置，產生的污泥及水需要收集在處理，這些都將成為二次廢棄物</li> </ul>

表 4：各類零組件適用之拆除技術

零組件類別 \ 拆除技術	液壓剪	空芯鑽	電漿	氧氣切割及液壓剪	鋸切	氧乙炔	電漿及液壓剪	手動拆解及氧氣切割	手動拆解—使用工具	手動拆解及電漿切割	研磨及氧氣切割	研磨及電漿切割
不銹鋼管(D≤25mm)	●											
不銹鋼管(D>25mm)			●		◐	◐						
碳鋼管(D≤25mm)	●											
碳鋼管(D>25mm)			◐		◐	●						
桶槽(不銹鋼)			●									
桶槽和容器(碳鋼)			◐			●						
熱交換器(不銹鋼)			●			◐						
熱交換器(碳鋼)						●						
泵浦(不銹鋼、碳鋼)(重量≤50kg)								●				
泵浦(不銹鋼)(重量>50kg)			●					◐				
泵浦(碳鋼)(重量>50kg)						●		◐	◐			
通風機(不銹鋼、碳鋼)(重量≤50kg)								●				
通風機(不銹鋼)(重量>50kg)			●					◐	◐	◐		
通風機(碳鋼)(重量>50kg)						◐		●	◐			
閥(不銹鋼)			●					◐				
閥(碳鋼)						●		◐				
馬達(重量≤50kg)								●				
馬達(重量>50kg)						●		◐	◐	◐		
空調管件(不銹鋼)	◐		◐				●		◐			
空調系統(不銹鋼)						◐		◐	◐	●		
空調管件(碳鋼)	◐		◐	●		◐			◐	◐		
空調系統(碳鋼)								●	◐			
空調系統(鋁)					●							
電纜和導線	●											
電氣設備(碳鋼)(重量≤50kg)								●				
電氣設備(碳鋼)(重量>50kg)						●		◐				
非金屬絕熱材料	◐					◐		●				
鋼結構(碳鋼)			◐		◐	●		◐				
屏蔽用小組件								●				
起重設備(碳鋼), 電動滑車						●		◐	◐			
消化器, 採樣箱(碳鋼)						●		◐				
管道, 排水溝		●										
密封和屏蔽門(碳鋼)						●						
內襯(不銹鋼)			●			◐			◐	◐		◐
內襯(碳鋼)						●			◐		◐	
其他通用設備						◐		●	◐			
技術設備的外殼(碳鋼)			◐		◐	●						
技術設備的外殼(不銹鋼)			●		◐							

●：非常適用； ◐：適用

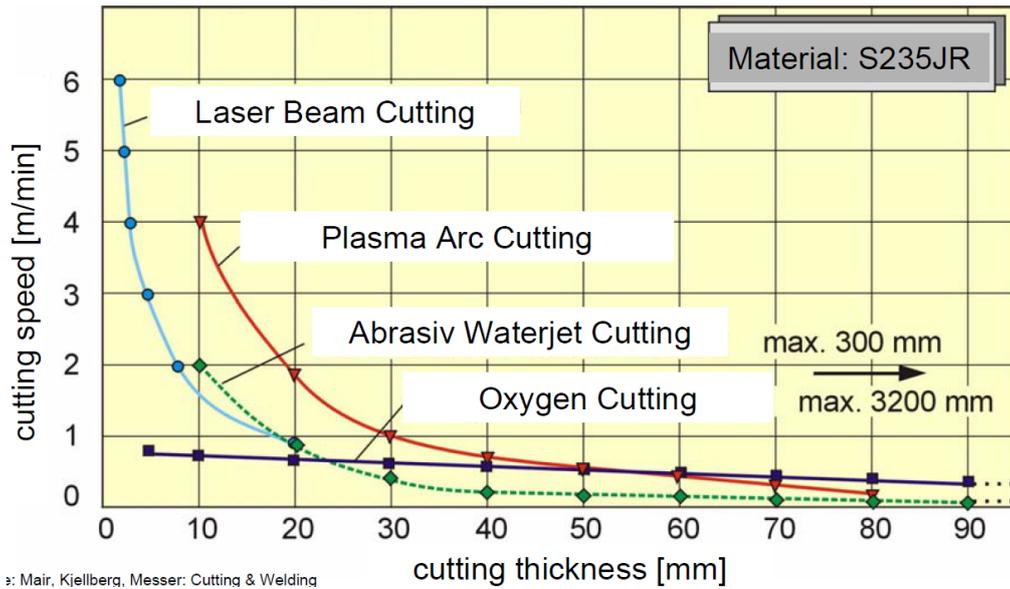


圖 44：比較不同切割工具的切割深度及速度

考慮 BWR 反應器壓力槽及其內部組件之形狀、位置及輻射狀況 (圖 45)，以及國外相關經驗，規劃核一廠 RPV 及其內部組件之切割工法及步驟如表五。

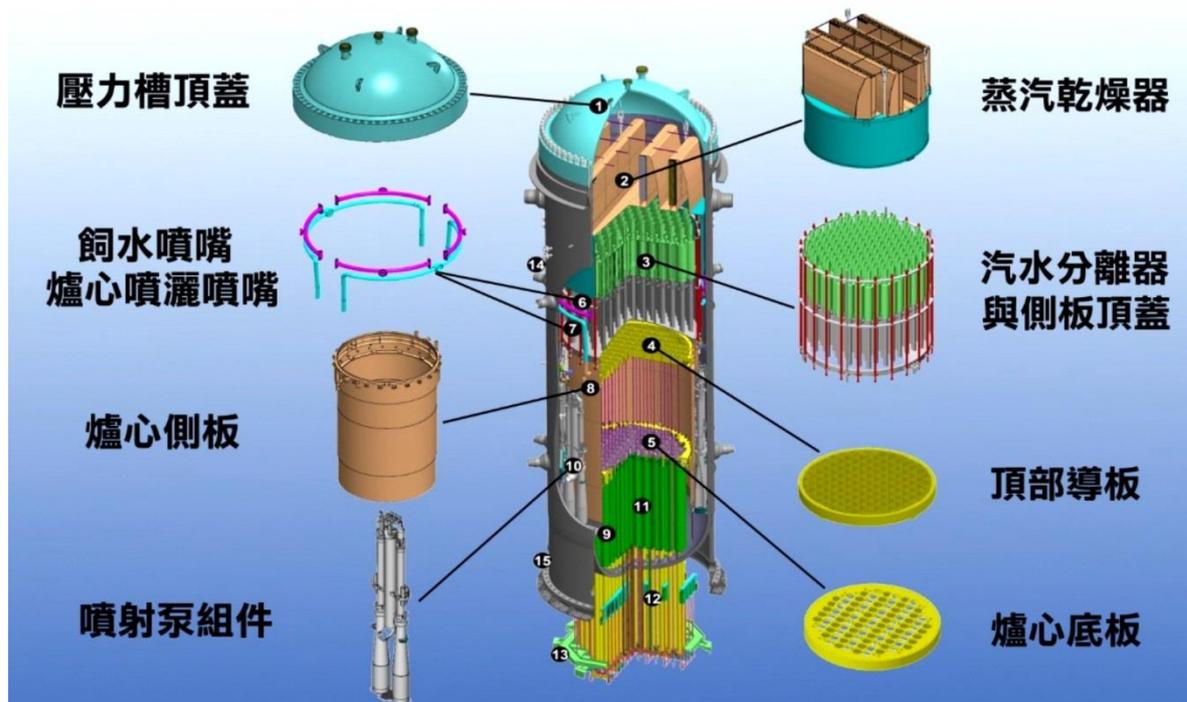


圖 45：BWR 反應器壓力槽及其內部組件

表 5：BWR 反應器壓力槽及其內部組件之拆除規劃

名稱	切割工法	切割地點	切割步驟
壓力槽頂蓋	機械式或熱切割 (空氣中)	反應器廠房 (臨時帳棚)	1. 除污 2. 切割
蒸汽乾燥器	機械式或熱切割 (水中)	存放池	1. 吊運至存放池 2. 切割上半部摺曲片 3. 切割下半部封閉裙板
汽水分離器與 側板頂蓋	機械式或熱切割 (水中)	存放池	1. 吊運至存放池 2. 從外往內，以及從上往下進行 切割
頂部導板	機械式或熱切割 (水中)	爐穴、存放池	1. 金屬破碎機去除熔接螺帽 2. 吊運至存放池，進行切割
爐心底板	機械式或熱切割 (水中)	爐穴、存放池	1. 金屬破碎機去除熔接螺帽 2. 吊運至存放池，進行切割
飼水噴嘴及爐 心噴灑噴嘴	機械式或熱切割 (水中)	爐穴、存放池	1. 切斷飼水噴嘴與反應器內壁 之間的管路 2. 吊運至存放池，進行切割
爐心側板	機械式、熱切割或 磨料水刀(水中)	爐穴、存放池	1. RPV 內進行橫向的分段粗切 2. 吊運至存放池，進行縱向細 切
噴射泵組件	機械式或熱切割 (水中)	爐穴、存放池	1. RPV 內進行拆解粗切 2. 吊運至存放池，進行細切
反應器壓力槽	機械式、熱切割或 磨料水刀(水中及 空氣中)	爐穴、反應器 廠房(臨時帳 棚)	1. 由上往下分段切割槽壁周圍 管路 2. 分段切割 RPV 槽體 3. 切割 RPV 半球狀底部與支撐 裙板

雖然 BWR 反應器壓力槽及其內部組件的拆除，可使用機械式或熱切割方式，但目前國外已鮮少採用熱切割，只要是切割會造成空氣中及水中懸浮微粒的散布，需要設置過濾系統加以收集，且會影響的能見度。使用機械式的鋸切或磨料水刀，或是兩者搭配應用，在國外都有實際的案例。

## 5.遙控拆除技術

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。

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。

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 46 是用於德國 MZFR 除役作業之機械手臂，為油壓及電動混合驅動，負荷能力為 200 kg。圖 47 是 RWE NUKEM 為輻射作業開發之油壓機械手，安裝於天花板上抓取地面之廢棄物。機械手攜帶工具進行切割的照片。圖 48 是美國 Rancho Seco 電廠進行 RPV 切割時所用之中央桅杆形式機械手，可攜帶水刀噴嘴移動。圖 49 是將圓盤鋸裝於機械手前端，應用於德國 Stade 電廠切除反應器外部之隔熱材料。圖 50 是英國 Hydro-Lek 公司所設計一系列可安裝於機械手前端的切割或抓取工具。



圖 46：機械手測試(MZFR)



圖 47：RWE NUKEM 為輻射作業開發之機械手

## Waterjet Manipulator

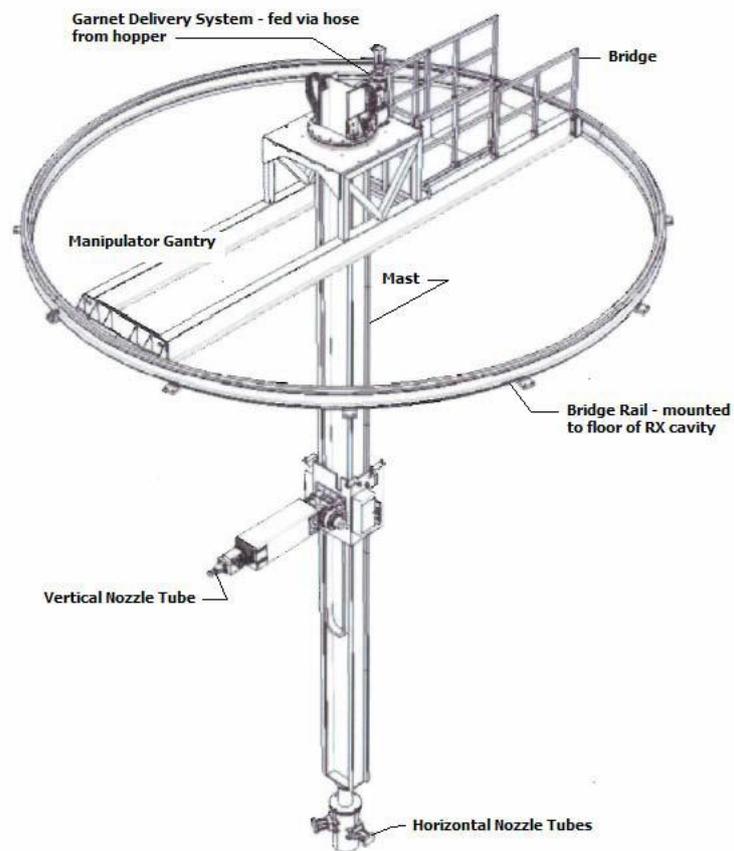


圖 48：機械手攜帶水刀噴嘴(Rancho Seco)

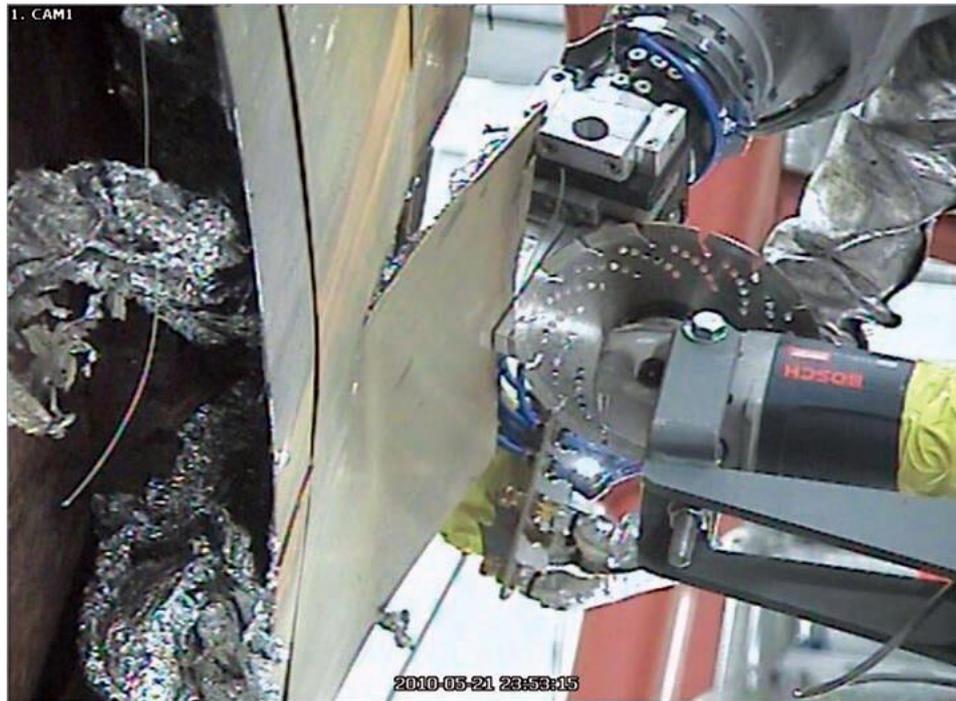


圖 49：機械手用於切除 RPV 外部隔熱材料(Stade)

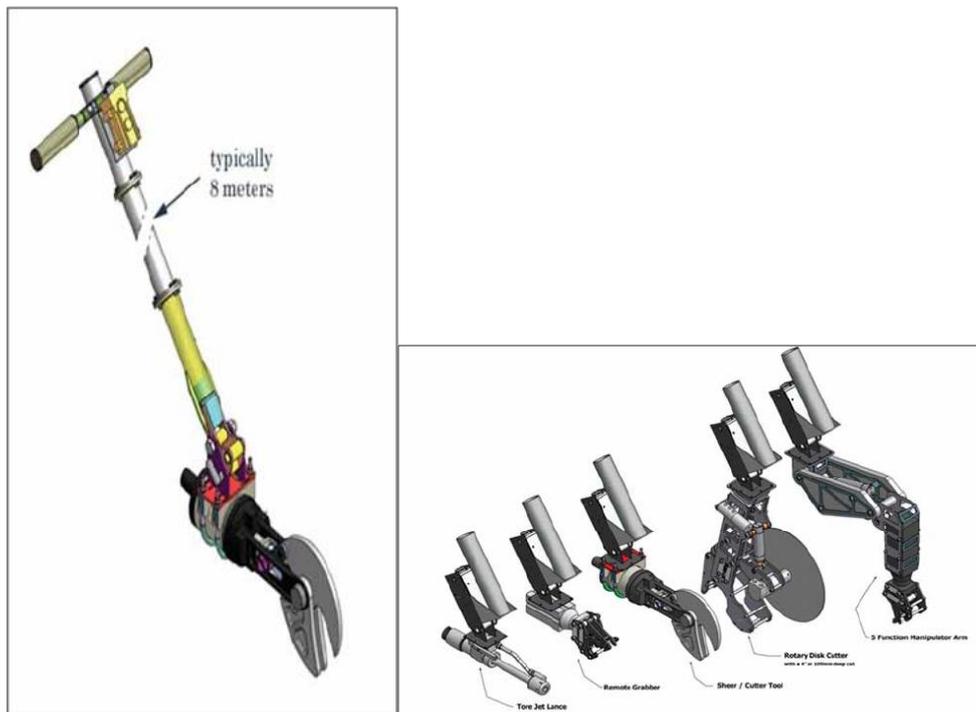


圖 50：機械手前端安裝各種工具

## 6. 結論

本文主要是敘述目前工業界一些常見的拆除切割技術，並參考國外核設施拆除的相關經驗，詳列這些技術的優缺點及適用之狀況。希望這些經驗日後能對除役規劃人員有所幫助，在執行核設施拆除的過程中，針對不同的應用可以選擇適當的技術。

### 6.1 研究結論

針對執行各種拆除切割技術所獲得的經驗教訓，如下：

1. 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。
2. 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。
3. 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。
4. 在評估遙控拆除技術之前，應對於其他的技術選項先完成透徹的分析，最後才考慮使用機器人，目的是要保持除役工作的單純化。

### 6.2 成果效益

本研究具有下列效益：

1. 學術成就：依據歐洲及美國核設施拆除之實際經驗，列出各種切割方法之優缺點，以及拆除各類型的零組件適用之切割方法。趨勢。成果有助於我國相關單位與研究計畫執行作業時參考應用。

2. 技術創新：在各種金屬零組件中 RPV 及其內部組件拆除工作是核設施除役中的重點，因為其輻射劑量最高，影響整個除役作業的成本、時程及整體人員劑量，蒐集國外核電廠 RPV 及其內部組件拆除之案例，研究所採用切割技術及未來趨勢。
3. 社會影響：本報告搜蒐集與歐洲及美國核設施拆除之實際案例，有關 RPV、管件、桶槽、鋼構等零組件拆除切割所採用之技術，有助於民眾了解國際核設施除役過程中的拆除作業，以減少日後國內進行類似工作時，社會及團體對相關議題之疑慮。
4. 非研究類成就：本報告有系統的整理各種切割金屬的方法，以及國外核設施拆除之經驗，可做為新進研究人員培育之基本資訊，對於國際現況能有全面性的瞭解。
5. 其它效益：蒐集國內外資料，以拆除方法及技術為主要目標，並擴展至除役相關議題(如廢棄物容器、廢棄物處理、除污等)，整理約 560 篇報告、簡報、論文等。

### **6.3 後續研發建議**

本文是針對金屬材料的拆除方法及選用技術的評估，並蒐集歐洲及美國核設施拆除之實際案例。但是，核設施除役工作中有另外一項工作，就是混凝土結構的拆除作業，比起金屬材料受污染或活化的混凝土其數量雖然較少，但建造一座核設施使用的混凝土數量卻非常龐大。在核設施除役過程中，良好的混凝土除污及拆除技術，可以有效減少受污染混凝土的數量，這將是後續研究之目標。

## 7. 參考文獻

1. “Innovative and Adaptive Technologies in Decommissioning of Nuclear Facilities”, IAEA-TECDOC-1602, 2008
2. “Decommissioning Technology Experience Reports”, EPRI Technical Report, 2000
3. R. Versemann, “Decommissioning nuclear plants: experiences in Germany”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2008
4. “Task group on remote handling techniques”, OECD Technical advisory group (TAG), 2011
5. “Dismantling Techniques, Decontamination Techniques, Dissemination of Best Practice, Experience and Know-how”, EC – CND Report, 2009
6. “Rancho Seco Nuclear Generating Station Decommissioning Experience Report”, EPRI Report, 2007
7. “ORNL Remote Operations for D&D Activities”, US DOE, 2007
8. Paulo E. O. Lainetti, “Cutting techniques for facilities dismantling in decommissioning projects”, International Nuclear Atlantic Conference, 2011
9. “State of the art technology for decontamination and dismantling of nuclear facilities”, IAEA, Technical reports series No. 395, 1999
10. “Recent United States and International Experiences in Reactor Vessel and Internals Segmentation”, EPRI Technical Report, 2011
11. “R&D and innovation needs for decommissioning nuclear facilities”, IAEA, 2014
12. “Reactor internals segmentation experience report”, EPRI Report, 2007
13. “The BR3 pressurised water reactor pilot dismantling project”, nuclear science and technology, 1998