

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

日本發電用反應器高活度設備拆除技術實例研究

**Study of Dismantling Technology for Highly Radioactive Equipment
at Power Reactors in Japan**

計畫編號：111B011

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：許文勝

聯絡電話：03-5715131 #35806

E-mail address：wshsu@ess.nthu.edu.tw

研究期程：中華民國 111 年 5 月至 111 年 12 月

研究經費：新臺幣 72 萬元

核研所聯絡人員：陳家貫

報告日期：111 年 12 月 5 日

報告內容係研究者之研究觀點，
不代表委託單位之政策或意見。

目 錄

中文摘要.....	1
壹、 計畫緣起與目的.....	3
貳、 研究方法與過程.....	5
一、 資料蒐集.....	5
二、 資料分析.....	5
三、 結果彙整.....	5
參、 前言.....	6
一、 JPDR 除役背景.....	6
二、 JPDR 概要.....	8
(一) 規格.....	8
(二) 運轉實績.....	10
(三) 拆除實績.....	11
肆、 JPDR 拆除計畫.....	13
一、 概要.....	13
二、 第一階段：研發反應器拆除技術.....	17
(一) 對技術問題的檢討.....	17
(二) 反應器拆除技術研發項目.....	18

三、	第二階段：JPDR 拆除實驗	26
(一)	合理抑低的具體對策.....	26
(二)	拆除順序.....	28
(三)	遠端拆除作業.....	29
(四)	拆除作業完成的確認.....	46
(五)	JPDR 拆除實驗的特點	47
伍、	JPDR 拆除成果.....	48
一、	工作量.....	48
二、	廢棄物產生量.....	50
(一)	JPDR 活度極低廢棄物掩埋處置驗證實驗	55
三、	拆除廢棄物管理.....	58
四、	工作人員曝露劑量.....	58
五、	除污作業.....	60
六、	廠房拆除.....	61
七、	對安全性的考量.....	61
八、	廢棄物對策.....	62
九、	提高作業效率.....	62
十、	拆除成果總結.....	65
陸、	今後課題	69

一、	依據 JPDR 拆除經驗的課題.....	69
二、	今後的課題.....	70
柒、	管制建議.....	74
捌、	參考文獻.....	76

圖目錄

圖 3-1	JPDR 拆除前全貌[1]	8
圖 3-2	JPDR 反應器圍阻體的剖面圖[2]	9
圖 3-3	3D 示意圖[1]	10
圖 3-4	JPDR 拆除後的空地[3]	12
圖 3-5	JPDR 壓力槽舊址[3]	12
圖 4-1	JPDR 反應器圍阻體拆除程序[4]	14
圖 4-2	JPDR 拆除廢棄物的總重量[6]	15
圖 4-3	JPDR 拆除廢棄物的比例[5]	15
圖 4-4	JPDR 除役廢棄物的管理[5]	16
圖 4-5	反應器拆除技術研發項目[10]	19
圖 4-6	JPDR 的組件、結構及其拆除工法[7]	28
圖 4-7	JPDR 拆除時程[7]	29
圖 4-8	利用電漿弧遠端切割工法拆除壓力槽內部結構物[6]	30
圖 4-9	機械臂機器人[8]	31
圖 4-10	吊桿式水中電漿弧切割裝置[8]	31
圖 4-11	利用電漿弧切割工法進行壓力槽內部結構物拆除作業[4]	32
圖 4-12	壓力槽內部結構物的組成[7]	33
圖 4-13	利用圓盤刀具進行壓力槽連接管路拆除作業[7]	35

圖 4-14	利用聚能裝藥進行壓力槽連接管路拆除作業[7]	35
圖 4-15	反應器壓力槽連接管路及其拆除工法[7]	36
圖 4-16	世界首次嘗試使用電弧圓盤鋸於水中進行壓力槽切割[6]	38
圖 4-17	電弧圓盤鋸的切割頭[8]	39
圖 4-18	利用電弧圓盤鋸進行壓力槽拆除作業[4]	40
圖 4-19	JPDR 生物屏蔽的剖面圖[8]	42
圖 4-20	利用機械切割進行生物屏蔽拆除作業[7]	43
圖 4-21	利用水刀切割進行生物屏蔽拆除作業[7]	43
圖 4-22	利用控制爆破進行生物屏蔽拆除作業[7]	44
圖 4-23	控制爆破施工後的破碎混凝土塊收集作業[8]	45
圖 4-24	JPDR 拆除後的綠地[9]	46
圖 5-1	JPDR 拆除實驗各工作量占比[7]	48
圖 5-2	混凝土地板除污[16]	49
圖 5-3	天花板活度偵檢[16]	49
圖 5-4	汽機廠房拆除[16]	50
圖 5-5	JPDR 拆除廢棄物占比[5]	50
圖 5-6	JPDR 拆除廢棄物產生量占比[15]	51
圖 5-7	JPDR 各活度等級放射性廢棄物占比[5]	53
圖 5-8	JPDR 拆除廢棄物分類細項[18]	54

圖 5-9	L1~L3 廢棄物的處置方法[20].....	54
圖 5-10	JPDR 活度極低廢棄物掩埋處置驗證實驗-1[18].....	55
圖 5-11	JPDR 活度極低廢棄物掩埋處置驗證實驗-2[18].....	56
圖 5-12	經粉碎處理後之非放射性混凝土窪地回填作業[16]	57
圖 5-13	JPDR 壓力槽內部結構物的表面等效劑量率[17].....	59
圖 5-14	工作人員曝露劑量占比[7].....	60
圖 6-1	未來商業發電反應器除役的基本概念[10].....	73

表目錄

表 4-1	放射性廢棄物的活度等級分類[6].....	16
表 4-2	開發的拆除工法及其性能[6].....	23
表 5-1	從拆除實驗中汲取的經驗[7].....	63

中文摘要

標題：日本發電用反應器高活度設備拆除技術實例研究

計畫編號：111B011

計畫參與人員：許文勝、楊雋之

所屬單位：清華大學

日本原子力研究所的 JPDR (Japan Power Demonstration Reactor) 是日本最初的發電用反應器也是目前唯一完成除役的電廠，於 1963 年開始運轉，1976 年結束運轉，1982 年開始第一階段除役準備作業，1986 年開始第二階段拆除實驗至 1996 年完成拆除。其拆除過程中所獲得的經驗對後續日本核電廠的除役作業提供了非常重要的參考價值。為確保國內核電廠安全除役，希冀藉由本計畫蒐集 JPDR 高活度設備拆解之實際案例，以瞭解日本除役實務經驗與作法，彙整並掌握相關拆除技術與應用範例，提供管制單位參考。

英文摘要

The JPDR (Japan Power Demonstration Reactor) is the first Japanese nuclear power reactor, which was constructed for the purpose of obtaining an experience of operation and decommissioning. The JPDR started to operate in 1963 and was shutdown in 1976. Its decommissioning program consists of two phases; Phase 1 and Phase 2 began in 1982 and 1986, respectively, and was completed successfully in 1996. The dismantling technology and lessons learned from JPDR are very useful for other plants to implement decommissioning project. The purpose of this research is to have insight into the operational experience of decommissioning at JPDR by means of collecting and analyzing its documents, especially those of dismantling technology for highly radioactive equipment. The results gained could be provided for regulatory application.

壹、計畫緣起與目的

為邁向 2025 年「非核家園」目標，於台灣 4 座核電廠中，核一廠 1、2 號機及核二廠 1 號機已進入除役階段，核二廠 2 號機及核三廠也將於運轉執照屆滿後陸續停止運轉，在核四不重啟之前提下，2025 年台灣將迎接「零核時代」。然而，在告別核電之後開啟的是另一條漫長且充滿挑戰的除役之路。

核電廠除役是一項極為龐大、複雜的工程，一般需耗費 25 至 30 年之久。根據核一廠除役時程的規劃，主要分成四個階段，包括：停機過渡階段、除役拆廠階段、廠址最終狀態偵測階段及廠址復原階段。而其中最具挑戰性的，就是除役拆廠階段所進行反應器本體與其他受中子活化之結構、系統及組件的拆除作業。針對這些輻射管制區域內高活度設備的拆除作業，除了需要高度的專業技術外，還需採取適宜的工法並輔以必要的專用設備，以確保除役拆除期間的輻射安全。

日本原子力研究所（現為原子力研究開發機構）的「動力試驗爐」JPDR (Japan Power Demonstration Reactor) 是日本最初的發電用反應器也是目前唯一完成除役的電廠，於 1963 年開始運轉，1976 年結束運轉，1982 年開始第一階段除役準備作業，1986 年開始第二階段拆除實驗至 1996 年完成拆除。其拆除過程中所獲得的經驗對後續日本核電廠的除役作業提供了非常重要的參考價值。

由於國內無先前拆廠經驗可循，為確保核電廠安全除役，希冀藉由本計畫蒐集 JPDR 高活度設備拆解之實際案例，彙整並掌握相關拆除技術與應用範例，以瞭解日本除役實務經驗與作法，提供管制單位參考。

貳、 研究方法與過程

本計畫規劃之執行方法及步驟如下：

一、 資料蒐集

蒐集日本原子力研究所 JPDR 除役相關研究報告，以瞭解日本在核電廠除役拆除實務上的經驗與技術應用。

二、 資料分析

分析與彙整有關高活度設備拆除的各項內容。

三、 結果彙整

彙整相關研究成果，並提出管制建議作為管制單位進行除役審查與相關執行作業之決策參考。

參、 前言

一、 JPDR 除役背景

日本原子力研究所（現為原子力研究開發機構：JAEA）的動力實驗爐「JPDR (Japan Power Demonstration Reactor)」是日本第一座發電用反應器(BWR)，於1960年開始建造，於1963年10月26日開始發電，為紀念日本首次使用核電，並將這一天定為「原子能之日」。

JPDR 是從美國奇異公司(GE)所引進的自然循環沸水式實驗研究用反應器，目的在於累積核電廠建造、運轉及保養維修的經驗，為日後的核電發展作準備，並藉由各種實驗及研究瞭解發電用反應器的特性，以及透過對國產燃料、材料等的照射實驗、特性實驗，為核電技術的國產化做出貢獻。

1969年JPDR進行了改造工程，將爐心冷卻方式從自然循環改為強制循環，使熱功率從原來的45,000kW倍增至90,000kW(JPDR-II)，其目的在於提供一個具有高功率密度的“燃料照射場”，以促進日本燃料技術的國產化。

1971年，在JPDR-II改造工程完成後，該反應器於1972年開始運轉，然而其後因多次發生故障，如冷卻水洩漏、控制棒驅動裝置異常等，由於查明故障原因及進行修復作業需花費相當的時間及經費，故最終於1976年永久停止運轉。

JPDR 的運轉經驗對日本輕水式反應器技術的建立、國產化提供了許多重要且寶貴的知識，作為先驅的示範反應器起到了重要作用。

1982 年，日本原子力委員會考量為未來核電廠的除役預作準備，於是提出對已完成當初使命的 JPDR 開啟除役計畫，並以研發商用反應器設施拆除所需技術及進行拆除實驗作為賦予的新任務。

有關日本反應器設施除役的應有方式及對策，日本原子力委員會於 1982 年的「原子力開發利用長期計畫」中，首次表明了其基本方針：

日本反應器設施的除役是以確保安全為首要前提，並在與當地民眾溝通協調下，於反應器永久停止運轉後儘早開始拆除作業，並且很重要的是將原廠址作為核電廠用地有效再利用。

依據該原則，日本原子力研究所接受科學技術廳的委託研究，開啟了《JPDR 拆除計畫》，並分為以下兩個階段進行：

- 第一階段(1982~1986)：研發與除役拆除有關的各種技術。
- 第二階段(1986~1996)：為驗證所研發的技術能夠安全拆解發電用反應器，故進行實際的拆除實驗，並

獲取相關知識、數據。

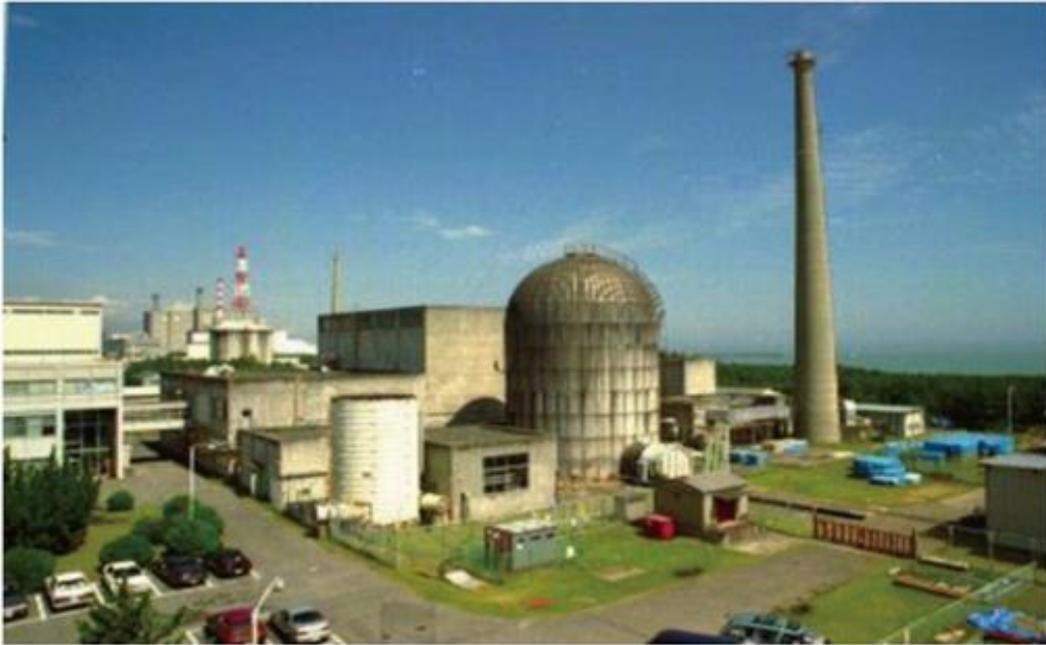


圖 3-1 JPDR 拆除前全貌[1]
攝於 1986 年（茨城縣東海村）

二、 JPDR 概要

（一）規格

- 反應器型式：沸水式反應器
- 熱功率：90,000kW（最初為 45,000kW）
- 額定功率：12,500kW
- 壓力槽：高 8.1m、內徑 2.1m、壁厚 7.3cm
材質為低合金鋼(ASTM-A302Gr.B)
內襯不銹鋼、圓筒形
- 燃料：濃縮度 2.6%UO₂（裝填量：4.2t）
- 平均熱中性子束密度： $3.8 \times 10^{13} \text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$

- 生物屏蔽：厚度 1.5~3m 、內徑 2.7m

由鋼筋混凝土構成，內襯鋼板

- 圍阻體：總高約 38m (地上約 24m)、直徑約 15m

鋼製圓筒形結構

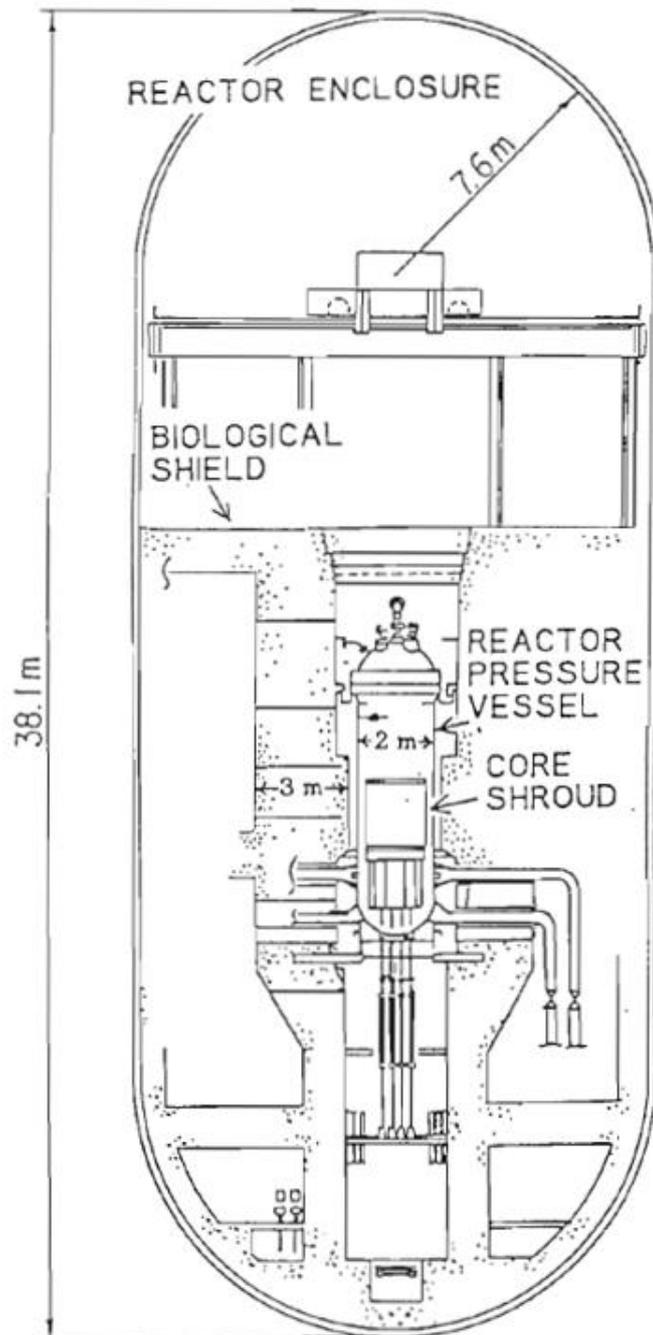


圖 3-2 JPDR 反應器圍阻體的剖面圖[2]

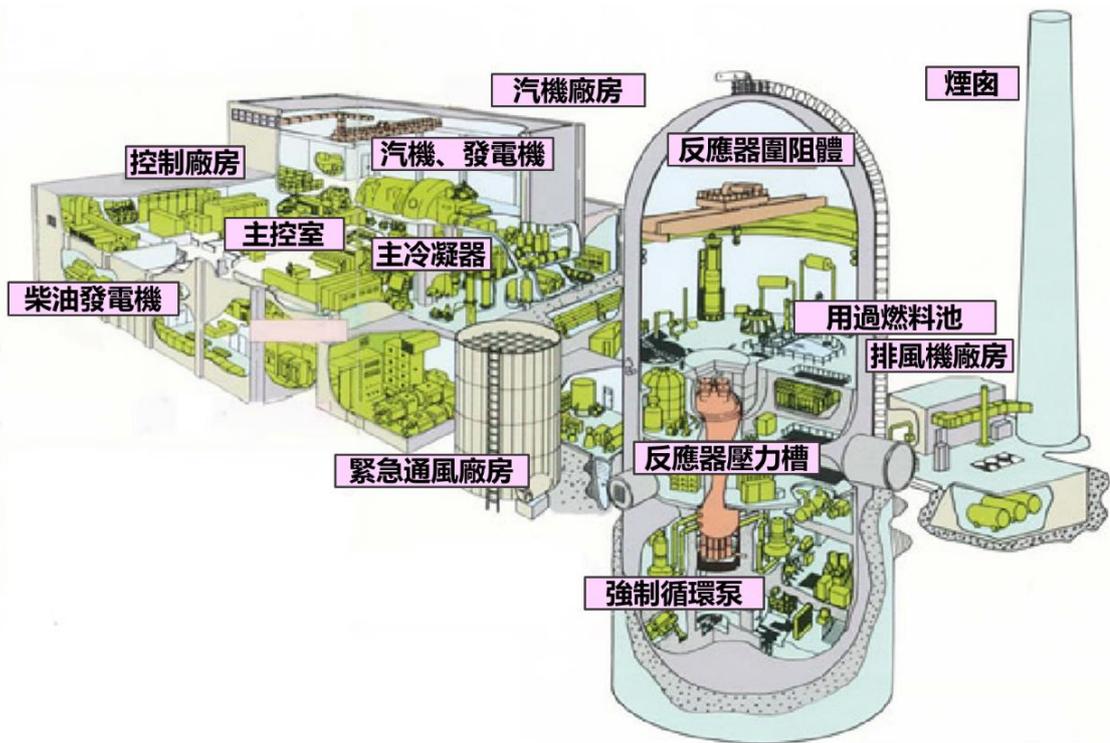


圖 3-3 3D 示意圖[1]

(二) 運轉實績

- 運轉時間：17,110h
- 發電時間：14,228h
- 產生熱功率：約 21,500MWD
- 發電量：約 1.4×10^5 MWh
- 反應器啟動次數：1,338 次
- 反應器急停次數：135 次（含測試）
- 活度總量： 1.74×10^{14} Bq（1986 年 3 月底數據）

壓力槽內部結構物 98.6%（放射活度幾乎都集中在壓力槽內部結構物內）、壓力槽 1.0%、生物屏蔽體 0.3%、其

他設備管路 0.1%。

(三) 拆除實績

JPDR 拆除實績

所在地	茨城縣，日本原子力研究所
許可區分	反應器設施
反應器型式	沸水式(BWR)
設施概要	日本首座實現核能發電的反應器
熱功率	90,000kW
建設費	約 45 億日圓
初次臨界	1963 年 8 月
永久停止運轉	1976 年 3 月
研發拆除技術	始於 1981 年，歷經 5 年時間研發
實際拆除作業	1986 年 12 月開始至 1996 年 3 月完成拆除
除役技術研發費	約 90 億日圓
設備拆除費	約 140 億日圓
產生放射性廢棄物	3,770 噸
工作人員集體劑量	306 人·mSv(為核電廠大修預估值的三分之一)



圖 3-4 JPDR 拆除後的空地[3]
包含反應器圍阻體等大部分的建築物已於 1996 年拆除完畢，
現為空地，攝於 2021 年



圖 3-5 JPDR 壓力槽舊址[3]
曾是爐心的地方已成為一塊空地，人員可安全接近，然而距離地表
1 公尺深度的地方仍存有當初建築物的地基、攝於 2021 年

肆、 JPDR 拆除計畫

一、 概要

由於停止運轉的反應器設施內仍存在著受放射性物質污染的設備及結構物，因此拆除這些設備及結構物時，需要曝露於輻射環境下進行。特別是反應器設施的結構堅固，而且以壓力槽為中心的部分具有很高的放射活度，為了降低工作人員的輻射曝露及提高工作效率，有必要利用遠端遙控技術進行拆除作業。於是，日本原子力研究所自 1981 年開始研發反應器設施拆除技術，並利用這些技術，於 1986 年開始進行 JPDR 的拆除實驗。

反應器設施的拆除有以下特點：

- 隨著拆除作業的進行，設備的狀況會有很大變化，設施內的輻射等級亦會有很大變動。
- 在短時間內產生大量不同活度等級、材料及形狀的固體廢棄物。

因此，在確保安全的首要前提下，進行 JPDR 拆除實驗時，應注意以下各點：

- 適當維護管理與除役安全有關的設備
- 減少工作人員的輻射曝露
- 妥善處理廢棄物

特別是在減少工作人員曝露方面，在擬定拆除計畫時，應對每個作業現場的等效劑量率進行預測及評估，並考慮以下幾點，擬定拆除順序：

- 利用現有結構的屏蔽效果及活度包封功能
- 從活度等級較高的設備及結構開始拆除
- 利用遠端遙控設備及局部通風系統

此外，有關遠端遙控拆除設備，在應用於管制區內實際的拆除作業之前，應事先於管制區外進行模型試驗(Mockup)，並將結果反映在拆除順序的擬定上。

拆除作業前期，以安全拆除為重要課題。拆除工程的施作順序是從壓力槽周圍組件開始，逐步拆除壓力槽內部結構物、壓力槽連接管路、壓力槽及生物屏蔽。之後，對建築物內部進行徹底除污並在拆除輻射管制區後，將包含圍阻體在內的所有建築物均全數拆除。最後，進一步清理及鋪設草皮後，終於在 1996 年 3 月完成 JPDR 的拆除實驗。

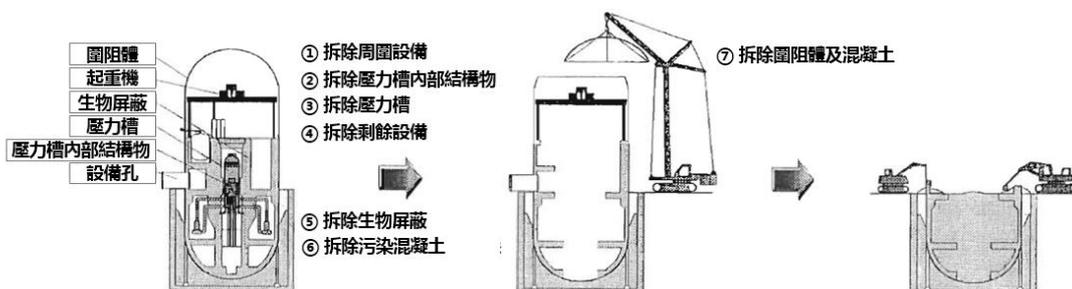


圖 4-1 JPDR 反應器圍阻體拆除程序[4]

產生的拆除廢棄物被分為放射性廢棄物及非放射性廢棄物，並依照廢棄物的性質、類型等嚴格分類管理；放射性廢棄物則根據活度等級、污染類型等作進一步分類管理。

表 4-1 放射性廢棄物的活度等級分類[6]

廢棄物的類型	等級分類			
	I	II	III	IV
活化金屬	4×10^3 以上	4×10^1 以上	4×10^{-1} 以上	未達 4×10^{-1}
活化混凝土		未達 4×10^3	未達 4×10^1	
污染混凝土				
(Bq/g) ※重量				
污染金屬	4×10^5 以上	4×10^3 以上	4×10^1 以上	未達 4×10^1
(Bq/cm ²) ※面積		未達 4×10^5	未達 4×10^3	

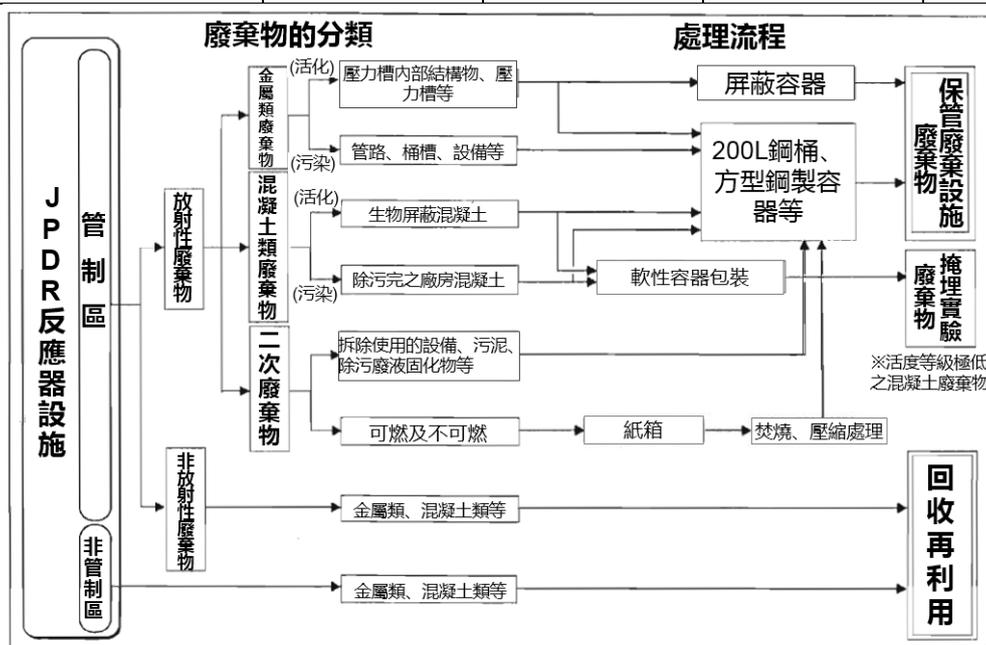


圖 4-4 JPDR 除役廢棄物的管理[5]

以 JPDR 為對象進行的反應器拆除技術研發及拆除實驗，實證了安全拆解反應器設施的能力。除役過程中所蒐集、整理到大量有關拆除的數據及資料，也可望能夠有效應用於日後商用發電反應器的除役。考量未來將陸續面臨商用發電反應器的除役，應以 JPDR 拆除經驗為基礎，發展出更安全、具有經濟性而且能夠被普遍接受的除役技術。

二、 第一階段：研發反應器拆除技術

(一) 對技術問題的檢討

反應器拆除技術的研發，主要源自於對以下技術問題的檢討：

1. 停止運轉的反應器設施與其他一般設施的不同之處在於：壓力槽內部結構物等在運轉過程中受到中子照射後產生的大量放射性仍殘留在設施內。其活度及核種，將根據反應器型式、輸出功率規模、運轉歷史等因素而有所不同。例如，1100MWe 級輕水式反應器在運轉 40 年後，預估的殘餘活度為數百萬 Ci。
2. 主要的核種包括 ^{55}Fe 、 ^{60}Co 、 ^{63}Ni 等，大部分的活度均集中在反應器周圍（壓力槽內部結構物、壓力槽、生物屏蔽內側）。
3. 針對活度等級較高的部分，需要使用遠端遙控技術進

行拆除。但由於這些結構體是堅固的鋼骨結構，切割及拆除的難度很大，因此需要利用先進的技術。

4. 此外，還有許多受到放射性物質污染的設備，例如一次側管路及設備的內表面，但活度很低。
5. 拆除 1100MWe 級輕水式反應器產生的廢棄物總重量推估為 50 至 55 萬噸左右。其中，有數萬噸是屬於放射性廢棄物，而且 98% 的活度等級低於 10^{-4} Ci/ton，以混凝土居多；剩餘 2% 則在 10^{-4} Ci/ton 以上，主要為金屬。

鑒於以上幾點，為提高除役作業的安全性及經濟性，有必要針對以下技術進行改良及研發：

- 遠端遙控技術、除污技術、輻射管理技術，以減少工作人員曝露。
- 設備拆除技術(拆除設備工法等)，以提升施工效率。
- 放射性廢棄物處理及處置技術。
- 安全評估、系統工程技術。

(二) 反應器拆除技術研發項目

原子力研究所的反應器拆除技術研發涵蓋了未來商用發電機組拆除所需的整體技術領域，其研發技術包含以下 8 個項目：



圖 4-5 反應器拆除技術研發項目[10]

1. 拆除系統工程

在拆除反應器設施時，有必要事先考慮及評估：作業人數及人員的輻射曝露、廢棄物產生量及拆除所需的費用等項目，從而擬定合理的拆除計畫（最適當的拆除方式、作業順序等），有效率地進行拆除作業。在研發拆除系統工程時，是以能夠滿足這些需求的評估軟體為目標，而開發了用於 JPDR 拆除的 COSMARD-JP，以及可擴展至商用發電反應器除役使用的 COSMARD-L。此種評估軟體的基本概念是：對拆除作業進行分析，先分解成各種基本作業，評估每個基本作業所需數量，再加總所有基本作業，即能夠得知整個拆除作業管理上所需的各種數量（如作

業人數等)。藉由比較計算結果與 JPDR 拆除作業數據以及加拿大原子能公司(Atomic Energy of Canada Ltd.: AECL) 類似軟體的計算結果，驗證了此評估軟體的有效性。經由本項技術研發，得以系統性地規劃與擬定反應器設施的拆除計畫。

2. 活度總量評估技術

在拆除反應器設施時，有必要適當評估設施內殘留活度、核種及分布，以選定拆除工法、進行人員的曝露評估及管理、推估放射性廢棄物產生量並對拆除廢棄物進行合理的處理及處置。然而設施內殘留活度、核種及分布會因反應器型式、輸出功率規模、使用的材料、運轉歷史的不同而有所差異，因此本項技術研發了兩種評估技術，即分別藉由計算及測量來進行評估。在計算方面，改良並結合遷移計算程式 (ANISN, DOT3.5) 及燃耗計算程式 (ORIGEN, DCHAIN) 進行，開發了能夠評估殘留活度的計算程式。在測量方面，則從設施內的不同位置進行取樣，藉此改良計算程式，同時亦開發了混凝土中難測核種(^{41}Ca , ^{36}Cl 等)的測量技術。

3. 輻射污染非破壞性檢測技術

評估反應器設施中殘留活度的方法包括：從目標結構中取樣的破壞性檢測方法，以及將偵檢器靠近結構以直接測量劑量率的非破壞性檢測方法。其中，非破壞性檢測方法由於不需要取樣，比破壞性檢測方法更適合用於難以取樣的結構。在非破壞性檢測技術方面，開發了活度望遠偵檢技術。此技術利用中空導管連接壓力槽內的活化結構物到偵檢器，藉由測量結構物所發出的 γ 射線，以測量遠端活度。為了順利進行拆除作業，在拆除前，先對管路內部的活度、核種及分布進行量化評估是很重要的。由於受污染的管路難以藉由理論計算進行評估，於是開發了管路系統內部活度測量技術。此技術可從管路的外部測量管路內部每個核種的活度濃度。透過這些技術的研發，能夠藉由非破壞性檢測方式，確定活化結構物及受污染管路等的活度。

4. 拆除相關除污技術

為了減少於拆除作業時工作人員的輻射曝露以及減少放射性廢棄物產生量，開發了拆除前系統除污技術、拆除後設備除污技術及廠房混凝土除污技術。在拆除前系統除污技術方面，利用流動細顆粒磨

料的研磨力，開發了流動研磨除污法；以及利用強氧化能力的硫酸與鈾的混合溶液，開發了氧化還原電位除污法，並且在一次側冷卻系統的實際應用上，獲得了良好的除污效果。在拆除後設備除污技術方面，對一部分拆除設備使用了電解除污法及浸漬化學除污法，並取得了除污效率、除污成本等各種數據。在廠房混凝土除污技術方面，則開發了微波粉碎除污技術，這是利用微波照射，藉由混凝土中水分的汽化膨脹作用，將表面粉碎、剝離。

5. 拆除工法及拆除設備

在拆除反應器設施時，需要對具有活度的壓力槽、管路、桶槽等鋼製結構物及生物屏蔽、廠房混凝土結構物進行安全且有效率的切割及粉碎。因此，根據這些設備及結構物的特性（材料、形狀、壁厚、活度濃度等）開發了拆除工法及拆除設備。在鋼結構拆除技術的研發方面，考量了作業空間的限制，並留意設備能否於狹窄區域內使用，以及對厚壁結構物切割時的適用性等。在混凝土結構物拆除技術的研發方面，則考慮了如何提高設備的拆除性能及減少粉塵等副產物的產生量。拆除設備的研發依照以下順

序進行：樣機製作、基本性能測試、設備系統化、模型試驗(Mockup)，經過了這些流程的改良後，應用於 JPDR 拆除實驗。在 JPDR 拆除實驗中，壓力槽內部結構物採用電漿弧切割法於水中拆除，壓力槽採用電弧圓盤鋸切割法於水中拆除。生物屏蔽的拆除則使用了三種工法（機械切割法、水刀切割法及控制爆破法）。

表 4-2 開發的拆除工法及其性能[6]

拆除對象	工法	切割能力
壓力槽	電弧圓盤鋸切割	<ul style="list-style-type: none"> 厚度 250mm，切割速度 60mm/min（水中）
壓力槽內部結構物	電漿弧切割法	<ul style="list-style-type: none"> 厚度 230mm，切割速度 50mm/min（空氣中） 厚度 130mm，切割速度 75mm/min（水中）
與壓力槽的連接管路	圓盤刀具切割 聚能裝藥切割	<ul style="list-style-type: none"> 管路 12B(管壁厚 33.3mm)，切割時間 28min 管路 12B(管壁厚 17.4mm)，切割時間 2.5min 管路 1.5B(管壁厚 5.1mm)，炸藥

		量 10g • 管路 3B(管壁厚 7.6mm), 炸藥量 50g
生物屏蔽 (混凝土)	機械切割 水刀切割 控制爆破	• 切割能力 1.3m ³ /h, 鑽孔效率 1.0m ³ /h • 切割深度 450~600mm, 切割速度 30mm/min • 破碎效率 0.1m ³ /h

6. 遠端拆除遙控技術

從人員曝露的角度考量，難以從近距離進行壓力槽內部結構物等高活度組件的拆除作業，在某些情況下不得不採用水中拆除方式，因此需要利用遠端遙控技術及系統，以便從遠處精準操作拆除設備。為此，藉由切割實驗累積了有關拆除工法及拆除設備遠端遙控技術之經驗，對遠端遙控系統的感測器進行了抗輻射試驗，並研發了控制系統，以及完成開發遠端作業機器人系統，上述機器人系統結合了電腦輔助電動主從機械手臂與視訊系統。在 JPDR 拆除實驗中，實際讓上述機器人系統抓取電漿炬並於水中完成爐內部分結構的切割，證明了具備所指定的

功能。

7. 輻射管理技術

為了有效進行拆除過程中的輻射管理，開發了各種輻射偵檢器：

- 針對拆除過程中從管制區移出的大量作業設備、工具等，開發了能夠自動判別移出物品有無污染的自動污染檢測裝置，從而節省測量作業的人力。
- 拆除過程中產生之低放射性固體廢棄物管理方面，則開發了固定形狀的廢棄物容器表面污染及等效劑量率自動測量裝置。
- 開發了能夠經由遠端操作進行設備及結構表面劑量率測量的高輻射劑量率測量裝置（可用於空氣中及水中），以減少工作人員曝露及提高作業效率。

8. 拆除廢棄物的處理、暫存及處置技術

反應器設施於拆除時，不同於運轉階段的是：壓力槽內部結構物及生物屏蔽等高活化廢棄物，以及管路、廠房混凝土等受放射性物質污染的廢棄物會在短時間內大量產生。因此，針對拆除廢棄物的處理、暫存及處置，開發了以下技術：

- 能夠利用塗層材料，以防止污染擴散的表面污染固

著處理技術。

- 能夠安全搬運及貯存高活度拆除物（如壓力槽內部結構物等）的屏蔽容器。
- 能夠將管路及設備的體積壓縮至 1/5 程度的壓縮及減容處理技術。

三、 第二階段：JPDR 拆除實驗

（一） 合理抑低的具體對策

確保安全是拆除反應器設施時最優先的考量，依據 ALARA(As Low As Reasonably Achievable)的概念，「在考慮到經濟及社會因素的情況下，將所有曝露盡可能抑低」是很重要的。

依據上述概念，JPDR 拆除實驗中所實施的具體對策如下：

1. 適當維護管理與除役安全有關的設備

拆除過程中利用既有的通風設備、電源設備、照明設備、輻射監測設備並予以維護管理，以確保安全並提高經濟性。

2. 減少工作人員的輻射曝露

在拆除計畫的擬定階段，對殘留活度(量、核種、分布)進行評估，並預測作業環境的等效劑量率。根

據上述結果，研擬最適當的作業方法（如採用遠端遙控設備等），並對一次側冷卻系統管路進行拆除前系統除污。在拆除過程中，利用現有結構的屏蔽效果及活度包封功能、從活度等級較高的組件開始進行拆除、利用遠端遙控設備及局部通風系統等污染預防措施、對人員進行教育訓練以掌握作業內容。對於遠端遙控設備，在開始進行管制區內實際拆除作業之前，事先於管制區外進行模型試驗，以擬定最適當的操作順序。

3. 妥善處理廢棄物

在拆除計畫的擬定階段，對殘留活度進行評估，並根據活度等級、材料等進行廢棄物產生量評估，確定廢棄物從產生、暫存到處置的管理程序。參考設施的使用歷史等，以確定污染部份，從而擬定合理的拆除順序及除污方法。在拆除過程中，提前將受污染部分拆除，以防止放射性物質不必要的擴散，並盡可能減少放射性廢棄物產生量。根據活度等級、材料等，對廢棄物進行分類並盡可能進行合理管理。盡可能降低廢棄物貯存體積，例如提高廢棄物貯存容器的貯存效率（填充率）。

(二) 拆除順序

首先拆除反應器周圍的組件及結構，並確保遠端拆除設備的設置位置。接著從壓力槽內部結構物開始，將所有活化組件及結構拆除。

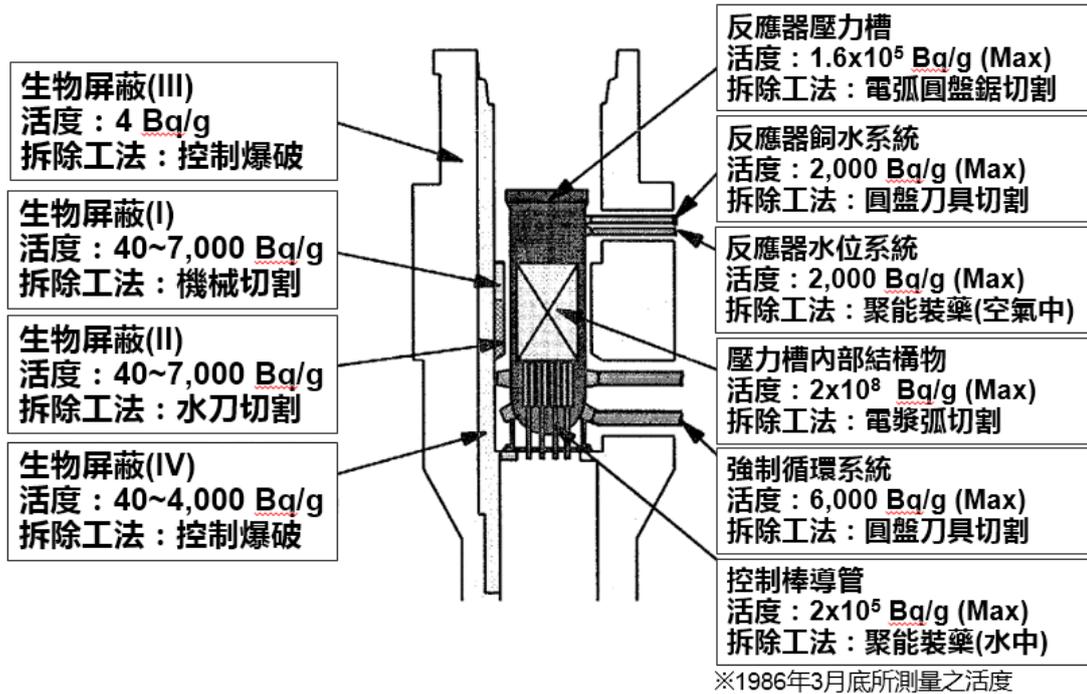


圖 4-6 JPDR 的組件、結構及其拆除工法[7]

在拆除完設施內的組件及結構後，進行廠房表面除污及活度確認偵檢。最後，解除輻射管制區，將剩餘廠房拆除。

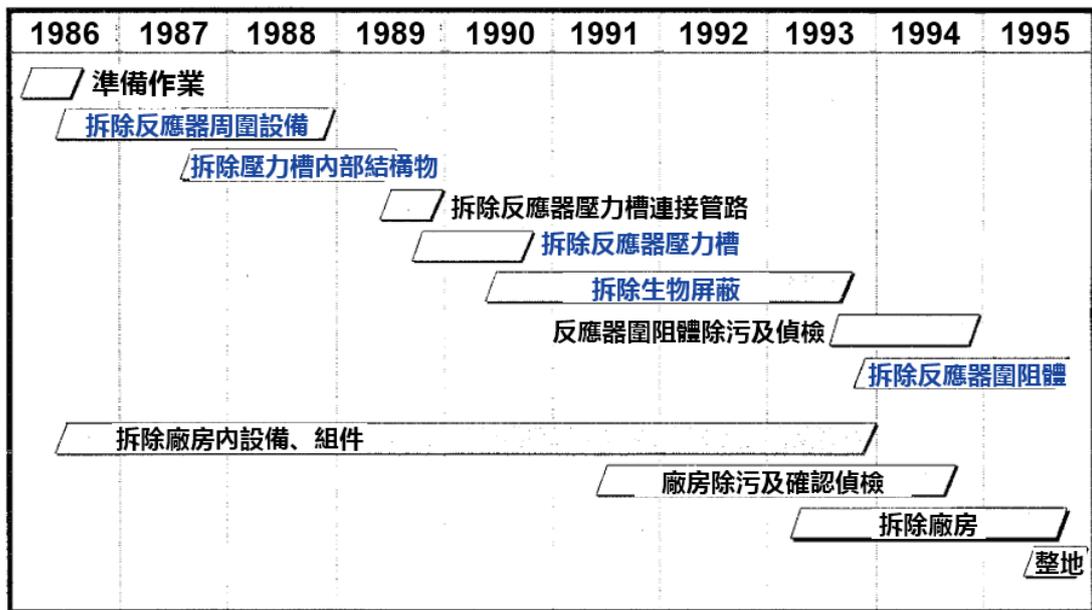


圖 4-7 JPDR 拆除時程[7]

(三) 遠端拆除作業

在拆除實驗中，利用所開發的遠端拆除技術完成了壓力槽內部結構物、壓力槽連接管路、壓力槽及生物屏蔽等高活化、高污染物的拆除作業。

1. 壓力槽內部結構物的拆除

壓力槽內部結構物是反應器結構物中活化程度最高的部份。JPDR 設置於爐心附近的設備，其等效劑量率約為 10Sv/h，因此在拆除壓力槽內部結構物時，一般需要以水作為輻射屏蔽，並藉由遠端操作方式（利用機械臂機器人或吊桿式遠端操作裝置），使用電漿弧切割工法進行水中切割作業（採用水中切

割的作業方式，除了可減少工作人員的輻射曝露外，亦能夠防止切割過程中產生的空氣懸膠體等副產物洩漏至外部)。

壓力槽內部結構物是由各種形狀複雜、用途不同的組件所組成，其中大部分材料為不銹鋼，需要切割的厚度範圍從薄件到厚達 110mm 的物件都有。這些不銹鋼由於被緊密地配置在反應器壓力槽內，因此拆除時特別需要狹窄區域的切割能力。

於是，原子力研究所開發了電漿弧遠端切割工法作為滿足這一需求的技術，其研發目的包括：

- 瞭解有效的水中切割條件。
- 藉由遠端操作將電漿炬精準定位到切割位置。



圖 4-8 利用電漿弧遠端切割工法拆除壓力槽內部結構物[6]

所開發的遠端操作裝置分別是：具有 5 個自由度的吊桿式遠端操作裝置以及一個具有 7 個關節、7 個自由度的機械臂機器人，並於 JPDR 拆除中進行了驗證。

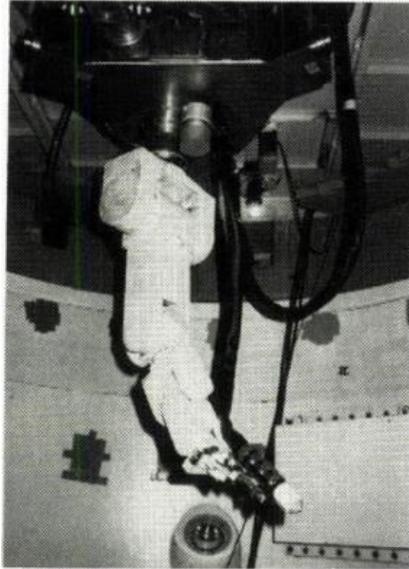


圖 4-9 機械臂機器人[8]

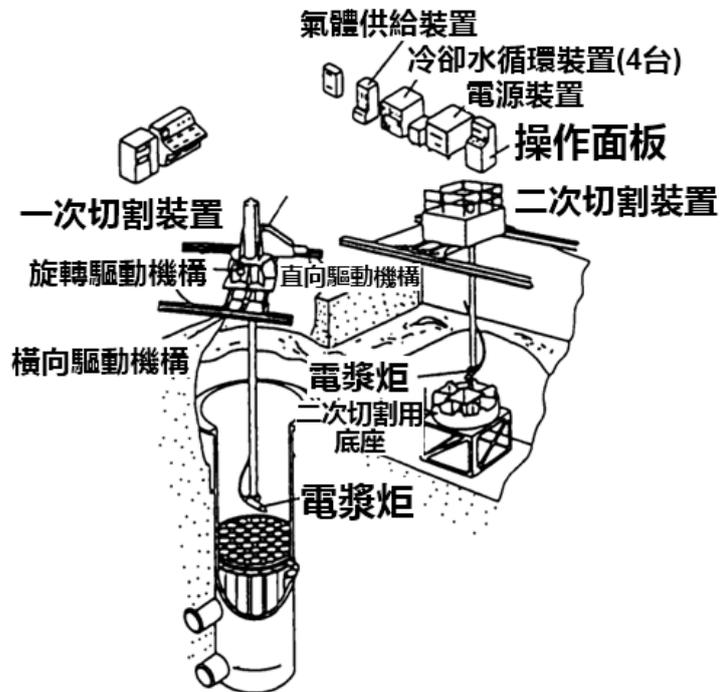


圖 4-10 吊桿式水中電漿弧切割裝置[8]

在拆除完反應器周圍設備及清理完圍阻體內用過核燃料池內後，接著進行了壓力槽內部結構物的拆除作業。由於 JPDR 壓力槽直徑大小只有 2m，要在如此狹窄空間中進行壓力槽內部結構物的切割並將拆除物收納進容器內，是很困難的作業。因此，大部分的壓力槽內部結構物是先在壓力槽中利用一次切割裝置進行粗略切割，再通過與壓力槽頂部連接的水道(Canal)傳送到相鄰的用過燃料池，在用過燃料池內利用二次切割裝置進行細部切割後，收納於屏蔽容器內。

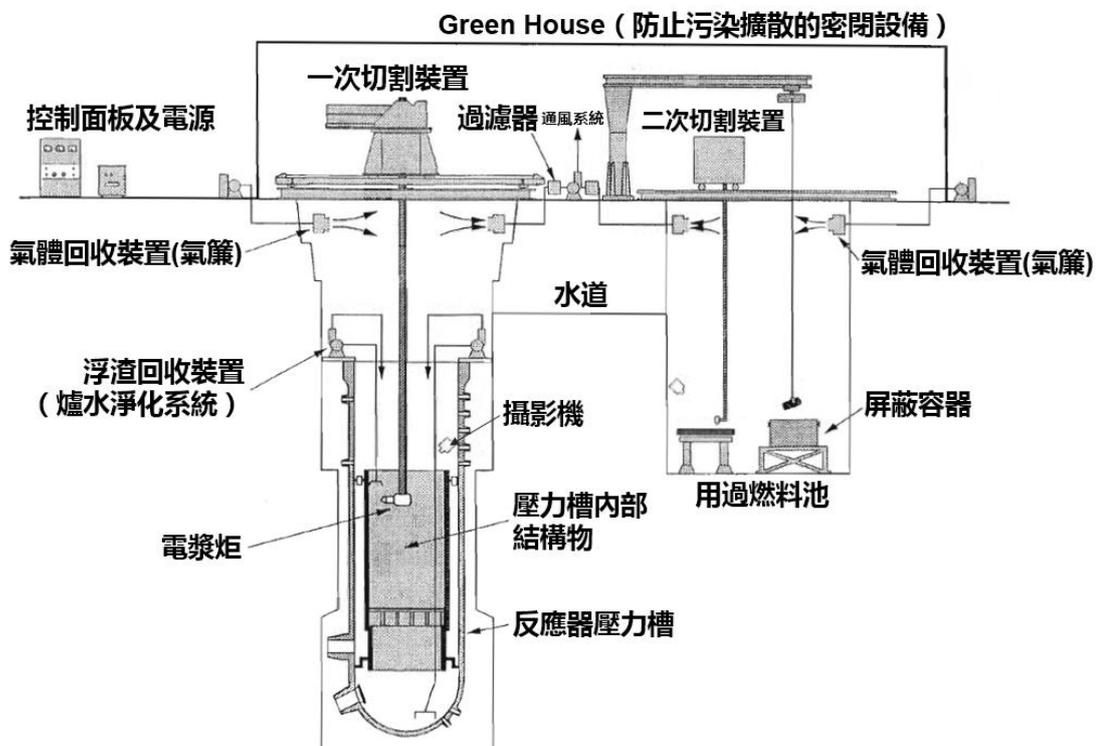


圖 4-11 利用電漿弧切割工法進行壓力槽內部結構物拆除作業[4]

根據待拆除設備的活度等級而選用不同的拆除工法。針對活度等級相對較低的設備：如蒸汽乾燥器、升流管外框、汽水分離器、爐心噴灑噴嘴等，是在反應器圍阻體 3 樓設置的 Green House（防止污染擴散的密閉設備）內進行電漿切割或直接完整收納於鋼製容器內。另一方面，針對高活度等級的設備：如爐心偵測器導管、爐心側板、底部支持板、頂部及底部格架、控制棒導管等，則於反應器壓力槽內進行粗略切割或完整取出並移至用過燃料池中，在用過燃料池內進行細部切割或直接完整收納於屏蔽容器內。

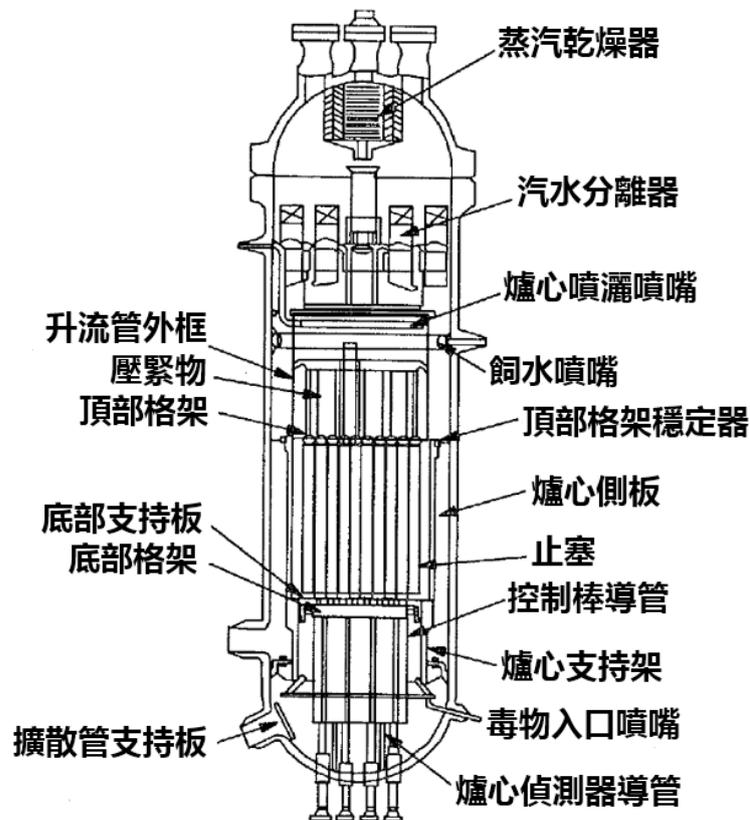


圖 4-12 壓力槽內部結構物的組成[7]

不論是機械臂機器人或吊桿式水中電漿弧切割裝置均展現了極好的作業性能。切割過程中，壓力槽內的水透明度非常好，水中攝影機畫面也很清晰。壓力槽內部結構物拆除完畢後，爐心內部的劑量率也從 9Sv/h 降至 9×10^{-3} Sv/h。雖然所有的拆除作業均已順利完成，而對水的放射性濃度、放射性粉塵及氫氣濃度的問題等也都提出了有效對策，但隨著未來技術的發展，仍應進一步改良遠端操作性能及水中監測系統。

2. 壓力槽連接管路的拆除

壓力槽上連接著各種不同口徑大小的管路，這些管路貫穿厚實的鋼筋混凝土所製成的生物屏蔽，再連接到壓力槽上，其中最大的管路口徑為 30cm。

因此，在拆除壓力槽之前，必須先移除與壓力槽連接的管路。管路切割作業通常是在壓力槽內沒有水的狀態下進行，除了需要考量切割位置的活度等級外，亦需要留意切割作業所產生的放射性氣體及粉塵，並提出解決對策。

一般來說，壓力槽噴嘴附近的區域均非常狹窄，作業空間受到嚴重限制。為此，日本原子力研究所開

發了圓盤刀具切割及聚能裝藥切割作為這些管路的遠端切割技術。

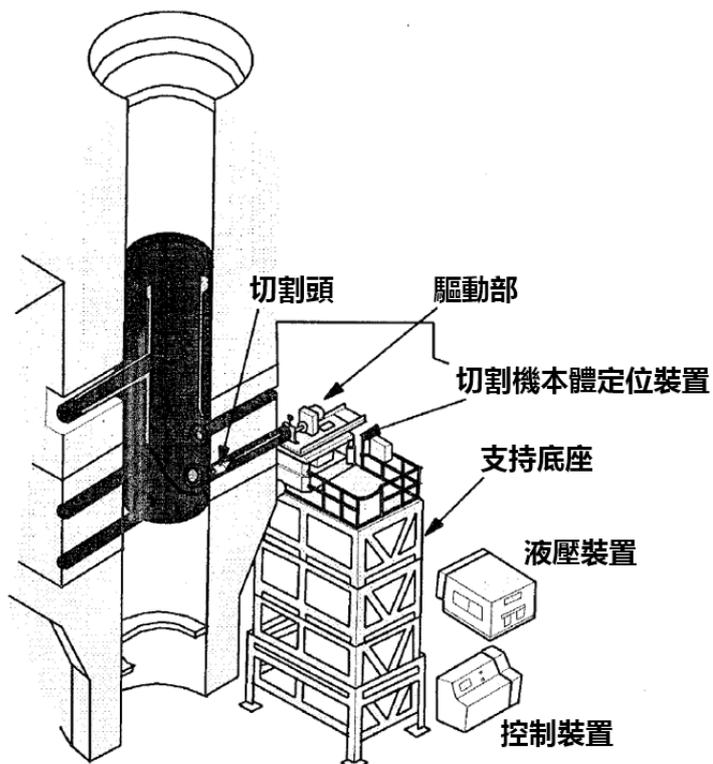


圖 4-13 利用圓盤刀具進行壓力槽連接管路拆除作業[7]

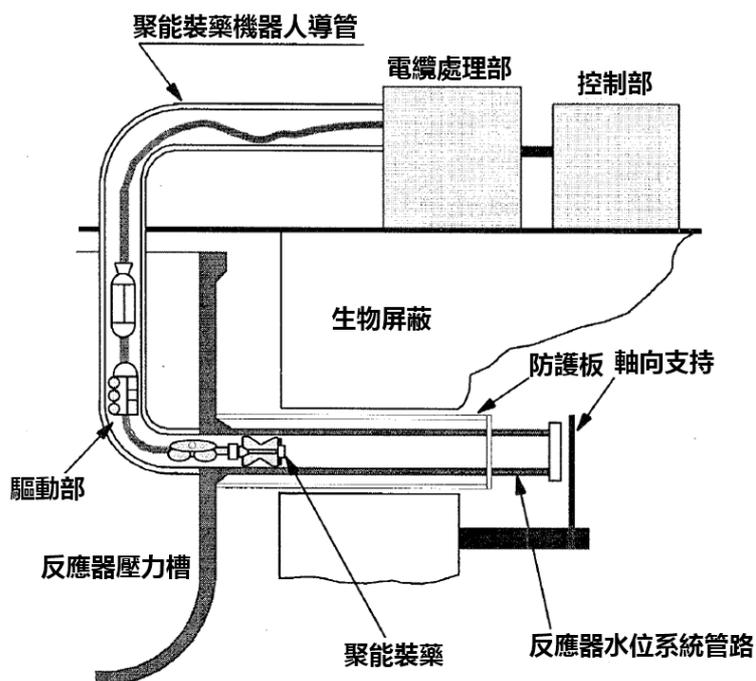


圖 4-14 利用聚能裝藥進行壓力槽連接管路拆除作業[7]

由於預定在壓力槽與生物屏蔽之間設置圓筒水槽，因此連接管路的拆除位置需貼近壓力槽，以便將壓力槽置於圓筒水槽內進行水中切割。

然而，壓力槽周圍的等效劑量率非常高，強制循環系統管路的噴嘴附近高達 1.3mSv/h。因此，連接管路的拆除作業可採用屏蔽板搭配既有工法，或透過遠端操作使用圓盤刀具切割或聚能裝藥工法進行拆除。

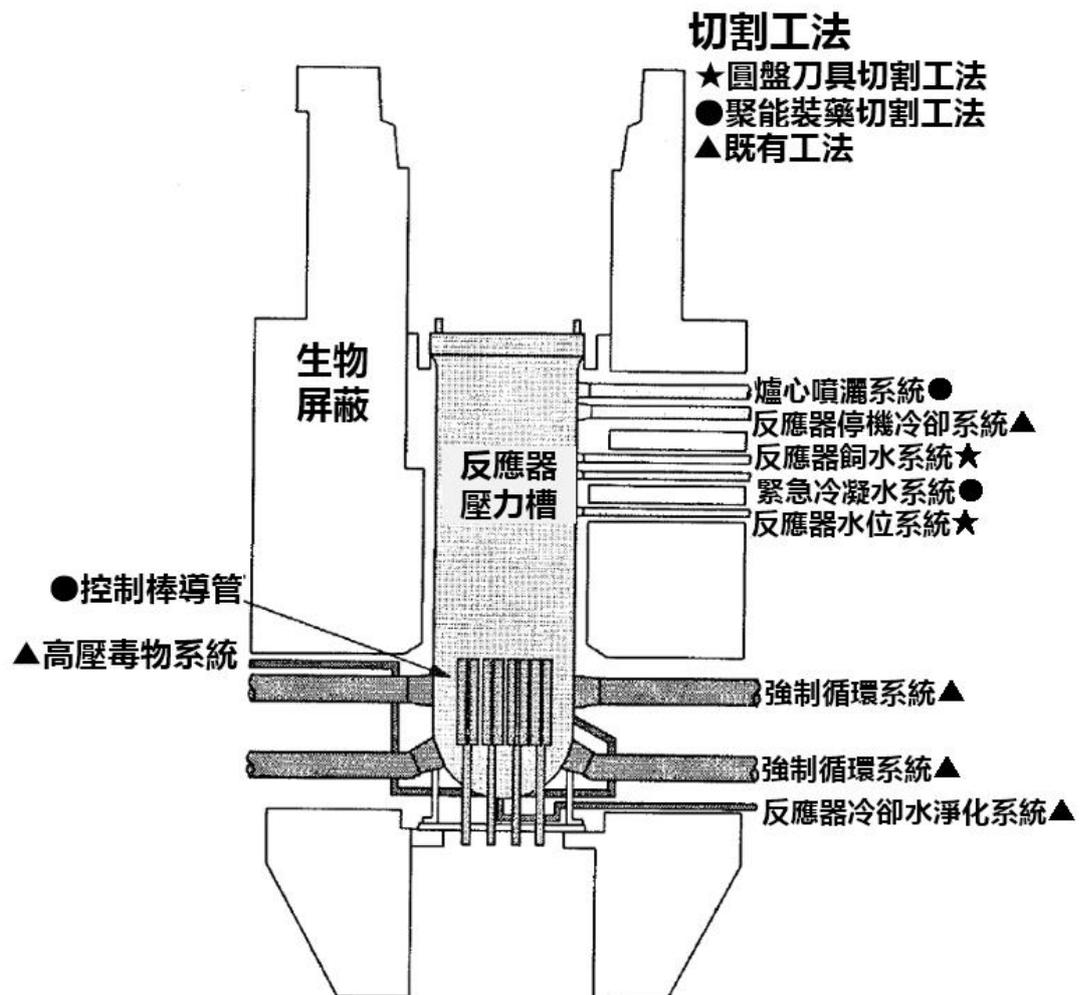


圖 4-15 反應器壓力槽連接管路及其拆除工法[7]

圓盤刀具切割裝置應用於較大口徑管路的遠端空氣中切割；聚能裝藥切割工法則應用於較小口徑管路的遠端空氣中切割及水中切割，同時也有使用既有的空氣中電漿切割裝置，並確認了其性能。這些作業雖然均已順利進行，但得到的拆除經驗是：

- 受限於部分管路內徑尺寸，有些部位無法順利插入圓盤刀具的切割頭。
- 採用水中聚能裝藥切割工法時，由於爆炸形成的高速金屬粒子流的能量損失變大，導致一些管路未能成功被切割。

使用新開發的遠端拆除技術時，雖然工作人員的曝露劑量能夠降至非常低，但工作天數卻出乎意料地長；相較之下，使用既有切割設備進行同樣的作業，工作人員的曝露劑量雖然較高，但工作天數卻極短。因此，在選擇切割設備及工法時，應事先充分考量這些技術的特點，以及適用的拆除物，這是很重要的。

3. 壓力槽的拆除

壓力槽雖然是一個形狀相對簡單的圓筒形，但卻是由很厚的低合金碳鋼(ASTM-A302Gr.B，凸緣：

242.1mm，筒身：67mm)所製成，且其內表面襯有不銹鋼(6.4mm)，故拆除時需要使用能夠同時切割不同種類金屬及厚壁的裝置。並且，由於壓力槽受到了高度活化，即使在拆除完壓力槽內部結構物後，爐心附近外圍的等效劑量率最大值仍達到 9mSv/h，故需藉由遠端操作於水中進行拆除作業。

為此，日本原子力研究所開發了電弧圓盤鋸切割技術，並應用於 JPDR 的拆除，以實際驗證其功能。

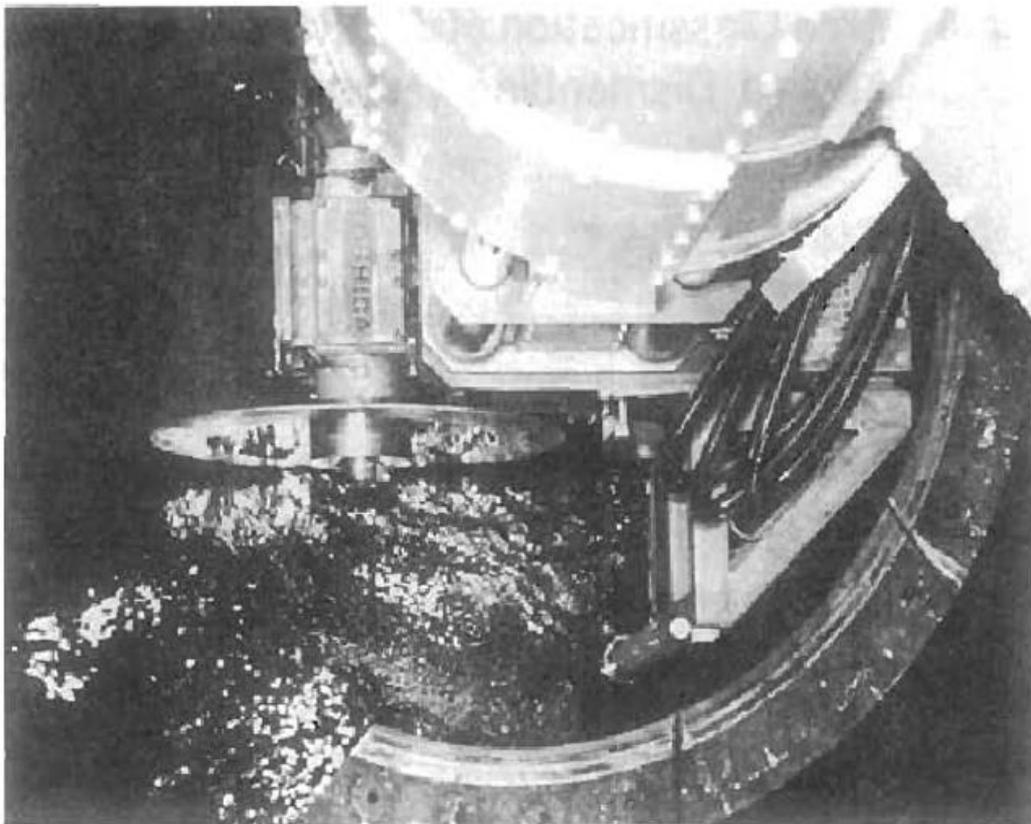


圖 4-16 世界首次嘗試使用電弧圓盤鋸於水中進行壓力槽切割[6]

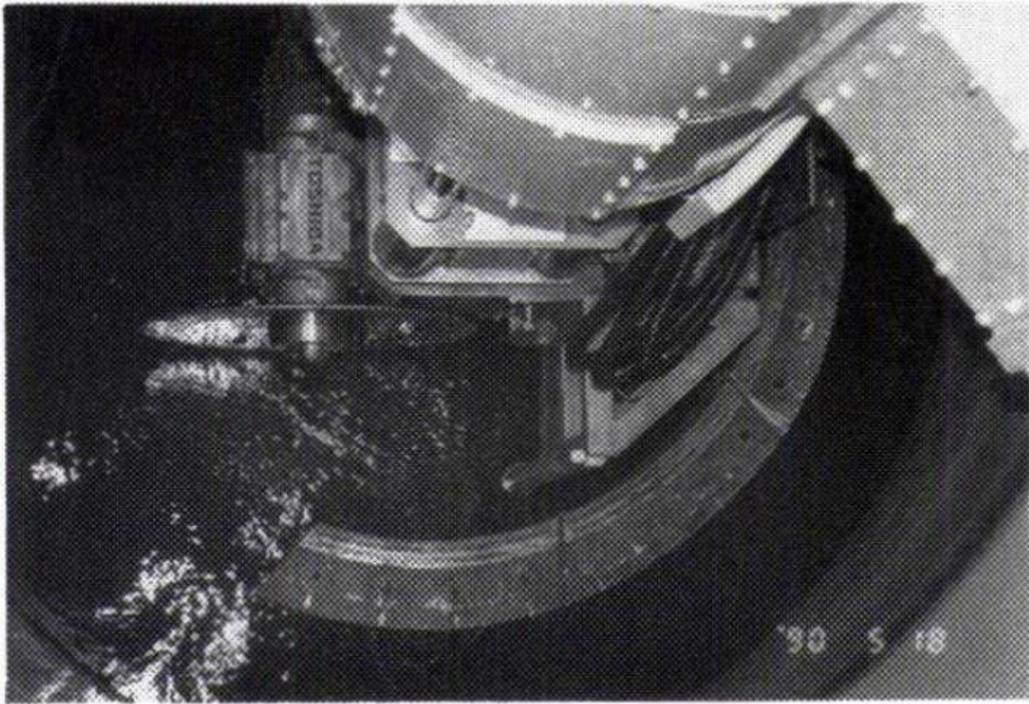


圖 4-17 電弧圓盤鋸的切割頭[8]

拆除時的活度為 $7.4 \times 10^{12} \text{Bq}$ 、最大表面等效劑量率為 0.12Sv/h 。

關於壓力槽筒身的拆除方法，首先在壓力槽與生物屏蔽之間設置一個圓筒水槽，並於其內放滿水，接著藉由遠端操作電弧圓盤鋸於水中切割活度較強的筒身（從凸緣起至下方 5.7m 的部分）；底蓋及頂蓋則由人員靠近施工，於空氣中使用氣體切割。

壓力槽筒身被切割為 60-90cm 的四方形塊狀，這些碎塊總計有 65 塊，並根據活度等級分別收納於鋼製容器或屏蔽容器內。

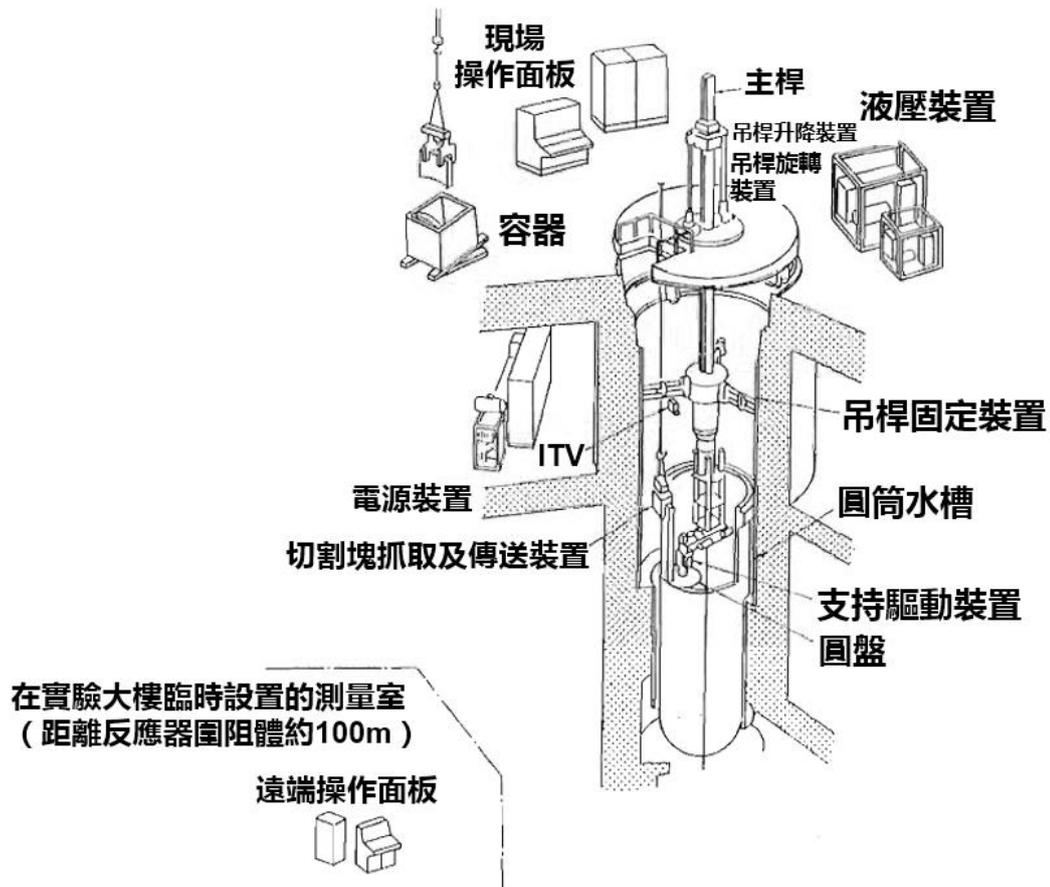


圖 4-18 利用電弧圓盤鋸進行壓力槽拆除作業[4]

此項拆除作業中，從拆除準備工作到作業完成，工作人員的總曝露等效劑量約 100 人·mSv。其中，曝露等效劑量占比最多的是來自圓筒水槽的安裝作業，約有 80 人·mSv；曝露等效劑量占比最少的是進行切割作業，曝露等效劑量降至約 2 人·mSv。

對於壓力槽的水中切割作業，從減少曝露的角度來看，如何規劃圓筒水槽的安裝作業，可說是一個重要的課題。

4. 生物屏蔽的拆除

生物屏蔽是一個堅固的鋼筋混凝土結構，為厚壁圓筒體、由粗徑鋼筋緊密配置而成。JPDR 的生物屏蔽，其鋼筋直徑為 28mm，配置間距約為 150mm。

生物屏蔽的壁厚為 1.8~3.0m，在相當於爐心高度的位置，為了增加屏蔽能力，於內側設置了一個厚度 40cm、高度約 3.7m 的附加壁。並且，內壁表面襯有約 13mm 厚度的碳鋼製襯墊。

雖然生物屏蔽的活化程度低於壓力槽內部結構物及壓力槽，但也由於受到活化關係，仍需採用遠端遙控切割技術；不過，生物屏蔽外壁表面的活化程度已迅速下降，不再需要考慮工作人員的輻射曝露劑量。

在拆除此種特性的混凝土結構時，需根據活化程度選擇適當的拆除工法。如何分類以進行切割、破碎及採取必要措施是很重要的。

為此，原子力研究所開發了機械切割法（金剛石切割及鑽孔）、水刀切割法及控制爆破法。前兩種工法均透過遠端操作將鋼筋混凝土切割成塊；後一種工法則是將混凝土破碎後拆除。

壓力槽拆除完畢後，接著就是生物屏蔽的拆除作業。

雖然壓力槽拆除完後，位於爐心周圍的生物屏蔽凸出部附近的等效劑量率最大已降低至2.2mSv/h，但這仍不是一個可以讓工作人員長時間近距離工作的環境，故藉由機械切割裝置及水刀切割裝置從遠端進行凸出部（生物屏蔽內側）的拆除作業。

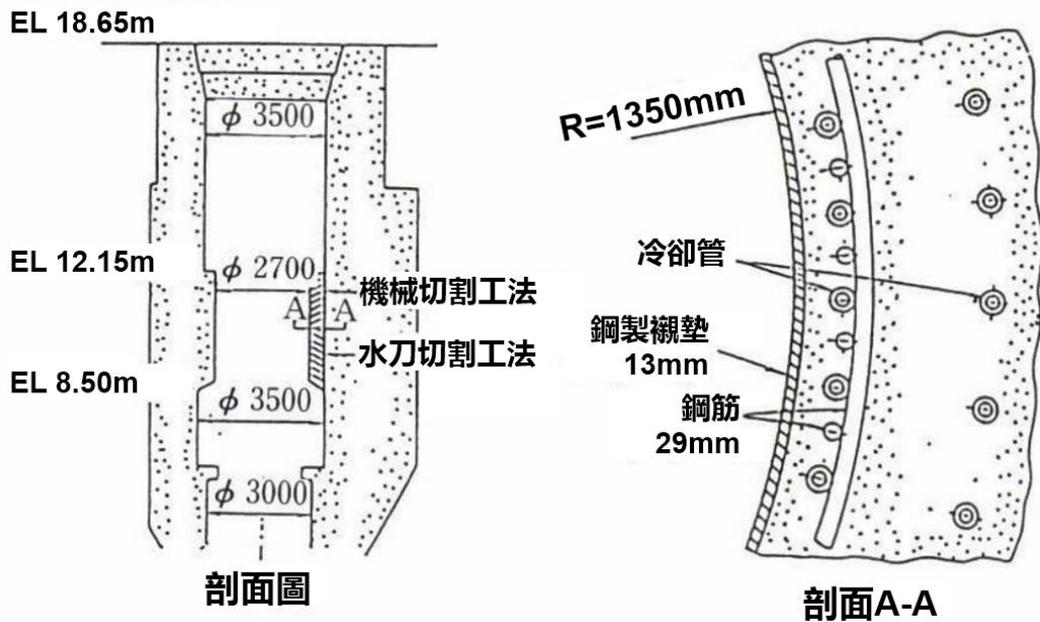


圖 4-19 JPDR 生物屏蔽的剖面圖[8]

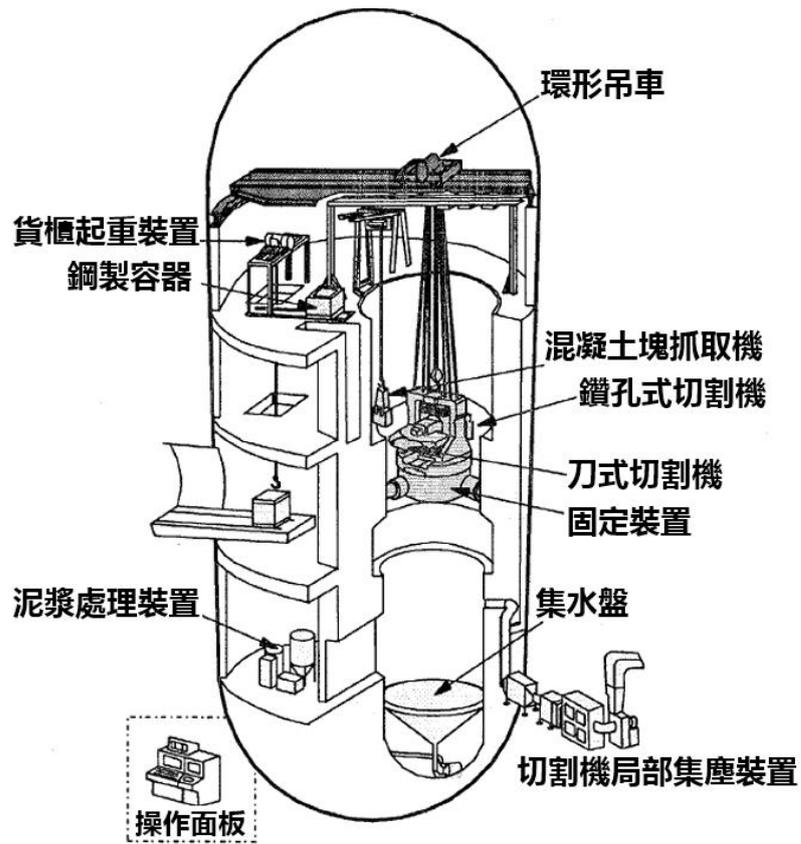


圖 4-20 利用機械切割進行生物屏蔽拆除作業[7]

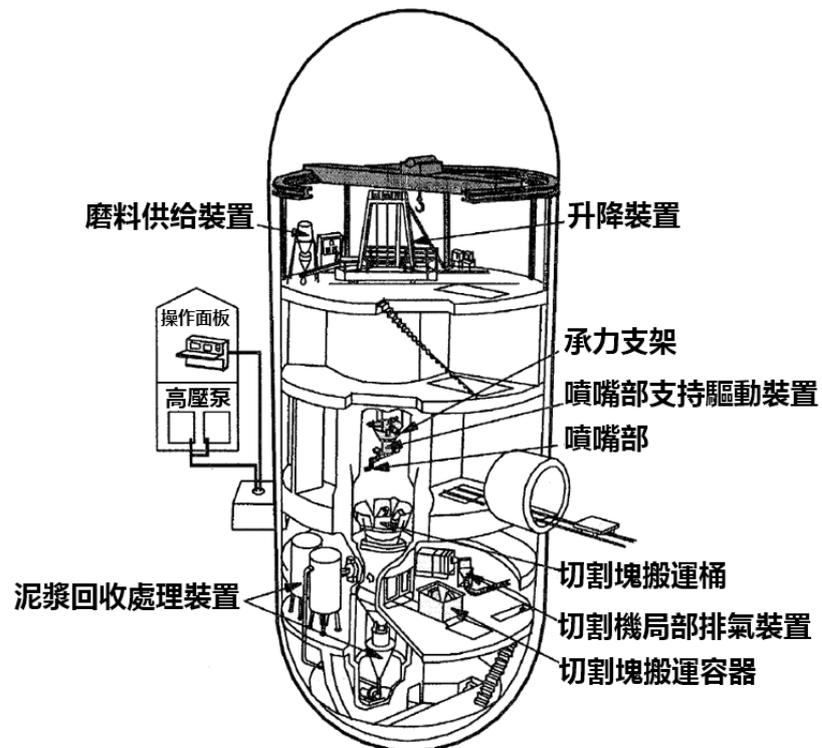
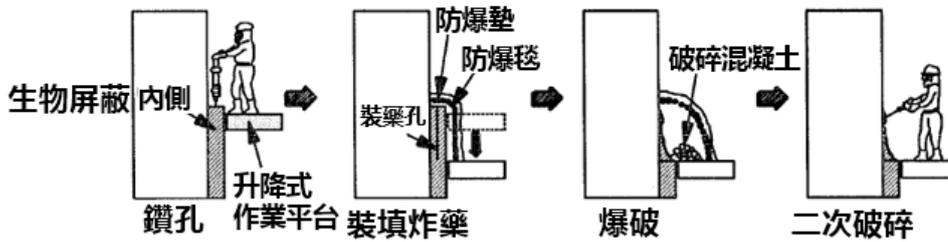
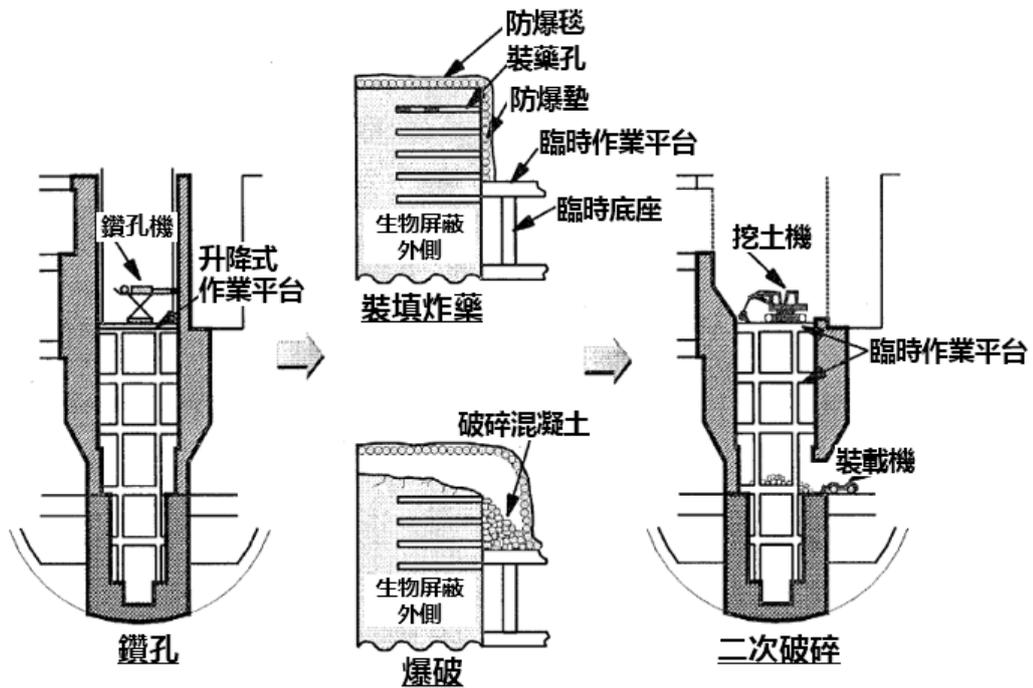


圖 4-21 利用水刀切割進行生物屏蔽拆除作業[7]

凸出部拆除完後，生物屏蔽內部的等效劑量率最大已降低至 50mSv/h，由於工作人員已能夠近距離工作，因此對於剩餘的混凝土（主要為生物屏蔽外側）則採用了具有良好拆除效果的控制爆破法加以拆除。



(1)生物屏蔽內側之施工順序



(1)生物屏蔽外側之施工順序

圖 4-22 利用控制爆破進行生物屏蔽拆除作業[7]

控制爆破法是針對要拆除的部分，以數十公分間距鑽一個小孔並裝填炸藥，並以微小的時間間隔，依序點燃每個炸藥，使混凝土破裂。

利用控制爆破法使生物屏蔽產生裂縫後，再使用既有工法將混凝土破碎並放入軟性容器內，然後運送至掩埋實驗場。

使用這些拆除工法在拆除過程中，雖未遇到任何意外的問題，但仍有必要進一步提升切割速度。由於此結構是由鋼筋與混凝土所組成的非均質結構，因此於遠端拆除時，與切割鋼結構相比，具有本質上的困難因素。



圖 4-23 控制爆破施工後的破碎混凝土塊收集作業[8]

(四) 拆除作業完成的確認

機器設備拆除完成後，經過廠房表面除污、活度確認偵檢，並且在確認無污染後，解除管制。之後，比照一般建築物，用重型機械拆除廠房結構。顯著有被污染或活化的廠房部分全部拆除，剩餘完成除污的結構物則拆除至地下 1m 深度。而廠房拆除後的地面坑洞，則以拆除之混凝土塊回填，並種植草皮進行綠地美化。



圖 4- 24 JPDR 拆除後的綠地[9]

對於拆除廢棄物：

- 低放射性固體廢棄物暫存於廢棄物貯存容器內。
- 而活度等級極低之混凝土廢棄物，則用於廢棄物掩埋實驗，並確實進行處置。

(五) JPDR 拆除實驗的特點

JPDR 拆除實驗的特點，包括：

- 所開發的各種遠端拆除設備均於實際拆除作業中獲得了驗證。
- 認識到適當管理廢棄物的重要性，根據廢棄物的特性(如活度等級等)，嘗試使用了不同的廢棄物容器，以有效管理廢棄物。
- 特別是，針對一部分的生物屏蔽及廠房表面除污後的混凝土(活度等級極低之混凝土廢棄物)等，開啟了日本首次於核設施廠址內進行低活度固體廢棄物簡單掩埋處置的道路。

伍、 JPDR 拆除成果

一、 工作量

JPDR 拆除實驗的總工期為 2,625 日；總工作量为 144,600 人·日。其中，特別是在拆除反應器周圍活化設備及組件（包含壓力槽內部結構物、連接管路、壓力槽、生物屏蔽）時需要最多人力，約占總工作量的 29%。雖然是使用遠端操作裝置進行作業但仍需較多人力的原因在於，這是第一次藉由遠端操作進行拆除作業，除了操作設備的人員以外，設備製造相關技術人員亦參與了現場工作。另一個原因是設備的安裝及調整等亦需要相對較長的時間。

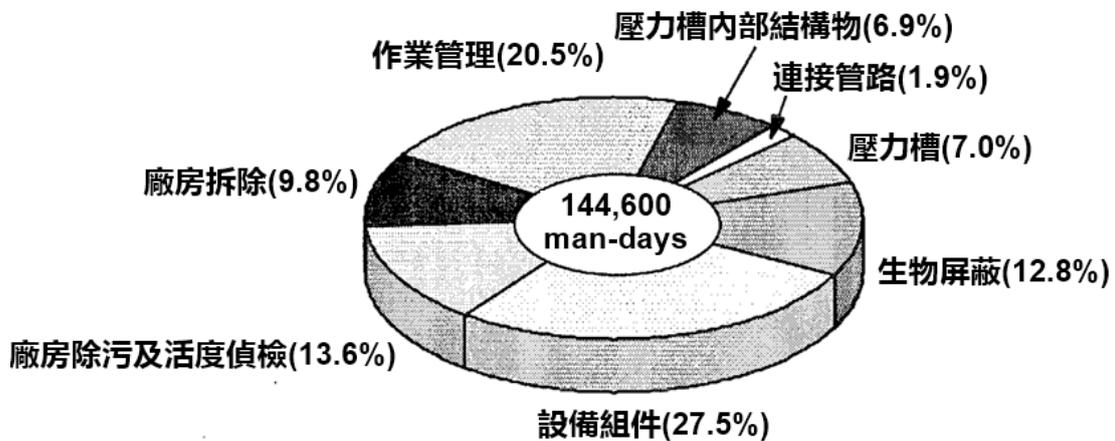


圖 5-1 JPDR 拆除實驗各工作量占比[7]

廠房除污及活度偵檢方面，約占總工作量的 14%，工作量約為 19,700 人·日。廠房除污及活度偵檢作業中，約有三成人力是用於確認偵檢作業，由於該測量方法是以 80cm 為

一區劃，直接對建築物整體表面（包括地板、牆壁及天花板的所有表面）進行活度偵檢，故需較多人力。



圖 5-2 混凝土地板除污[16]



圖 5-3 天花板活度偵檢[16]

廠房拆除方面，約占總工作量的 9.8%，工作量約為 14,200 人·日。廠房拆除作業中，約有五成人力用於拆除埋設於地下的管路，主要是在拆除掩埋的地下管路時亦需開挖混凝土，故需大量人力。



圖 5-4 汽機廠房拆除[16]

二、 廢棄物產生量

JPDR 拆除共產生了 24,400 噸的拆除廢棄物，高於原先計畫所預估的 22,500 噸廢棄物。與預估值出現差異的原因，主要是二次廢棄物產生量（440 噸）超過預期。從結果來看，遠端拆除作業中產生了很多的二次廢棄物。這是由於拆除時使用的機器設備在用完廢棄後，被分類為二次廢棄物的關係。

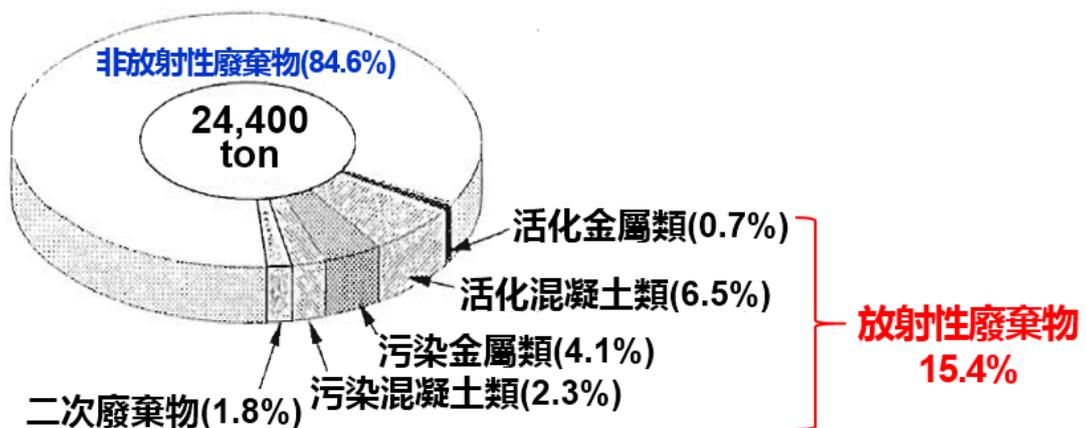


圖 5-5 JPDR 拆除廢棄物占比[5]

放射性廢棄物中，包括金屬廢棄物、混凝土廢棄物及二次廢棄物等約有 2,100 噸被貯存於 JAEA 原科研¹廠址內的放射性廢棄物保管廢棄設施。其中，除了壓力槽內部結構物等少量具有相對較高活度的活化金屬廢棄物需要以屏蔽容器（約 30 噸）貯存外，其餘皆屬於活度相對較低的放射性廢棄物。混凝土廢棄物則大部分為活度極低的放射性廢棄物。這種活度極低的混凝土廢棄物約有 1,670 噸用於原科研廠址內的廢棄物掩埋實驗，以驗證廢棄物簡單掩埋處置的安全性，證明可以在不影響環境的情況下進行掩埋。

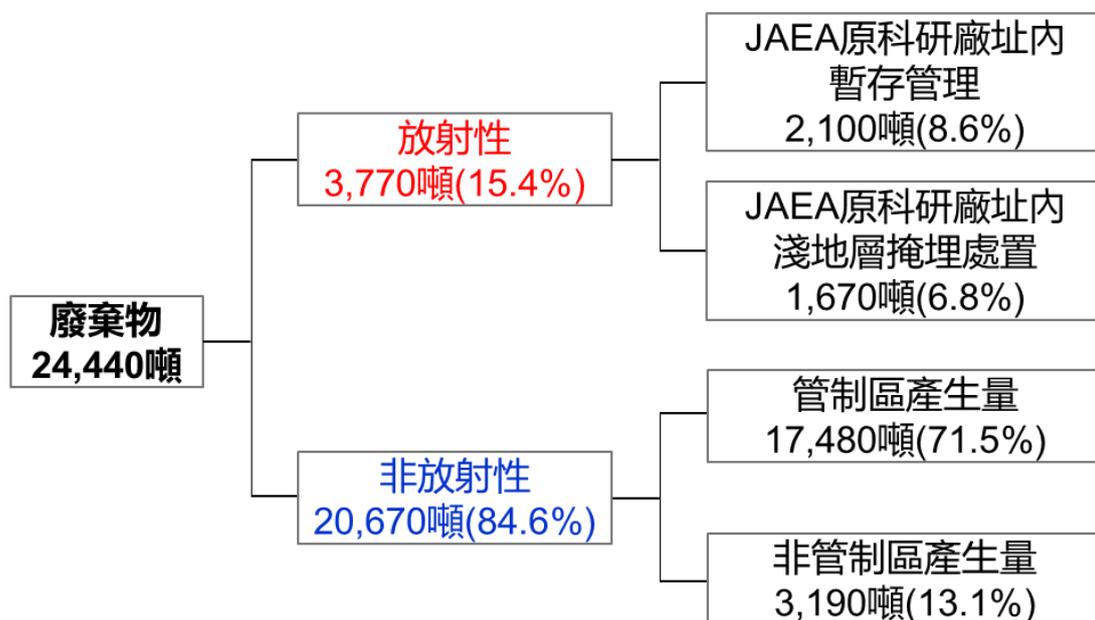


圖 5-6 JPDR 拆除廢棄物產生量占比[15]

¹ 當時的日本原子力研究所東海研究所，現為日本原子力研究開發機構(Japan Atomic Energy Agency, JAEA)原子力科學研究所，簡稱：原科研。

JPDR 拆除產生的放射性廢棄物，在按照材料（金屬、混凝土等）、性質（活化特性：活化或受到放射性核種污染）、活度等級等進行分類後，再有效率且安全地裝進適合的貯存容器中暫存，以便於將來處理及處置。

- 依材料分類：金屬、混凝土、二次廢棄物（包括廢樹脂、污泥、過濾器、遠端拆除時使用的設備等）。
- 依性質分類：活化金屬、活化混凝土、污染金屬、污染混凝土。
- 依活度等級分類：劃分為活度等級 I~IV（例如，壓力槽及其內部等高活度組件被分類為活度等級 I，並貯存於專用的屏蔽容器中）。

大部分的放射性混凝土廢棄物是在拆除生物屏蔽時產生的。從活度等級占比來看，約有 80% 的廢棄物為活度等級最低的 IV 級。放射性混凝土廢棄物中，除了生物屏蔽以外，其餘均為 IV 級。

金屬廢棄物則根據其產生地點不同，活度等級亦不相同。I 級的金屬廢棄物是壓力槽內部結構物及壓力槽的拆除物；II 級的金屬廢棄物由壓力槽的一部分及生物屏蔽的配筋所產生；III 級則為生物屏蔽的鋼筋；IV 級則由一般機器設備拆除所產生。

所有的二次廢棄物均為污染廢棄物。活度相對較高的：如污泥；活度相對較低的：如拆除時使用的設備、包裝在紙箱內的可燃物、小部分的不可燃物等。

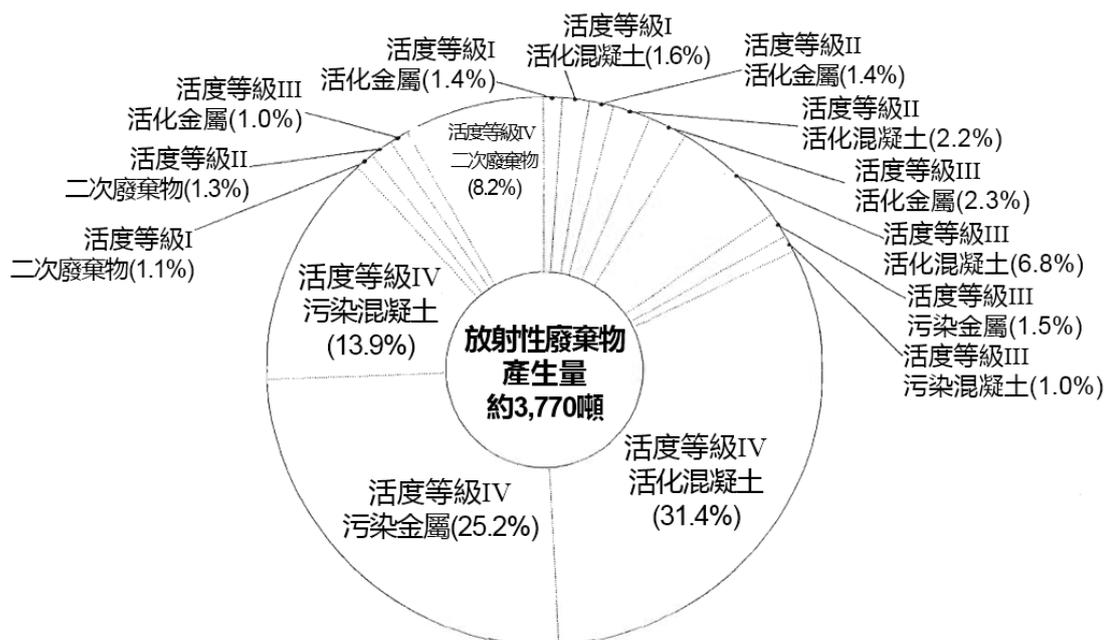


圖 5-7 JPDR 各活度等級放射性廢棄物占比[5]

放射性廢棄物中除了活度等級極低之放射性混凝土以外，全部暫存管理。對產生的廢棄物進行了適當分類，並適用了「非放射性廢棄物」概念，因此9成以上的廢棄物均能夠處置及再利用。剩餘約 2,100 噸，包括如污染及活化的金屬、混凝土則需 L1~L3 的處置。

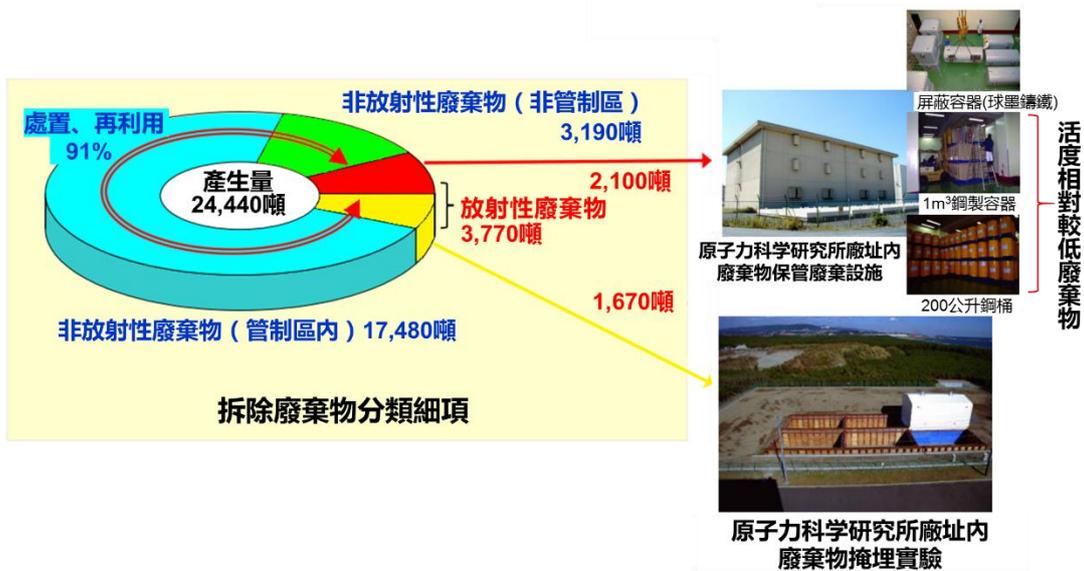


圖 5-8 JPDR 拆除廢棄物分類細項[18]

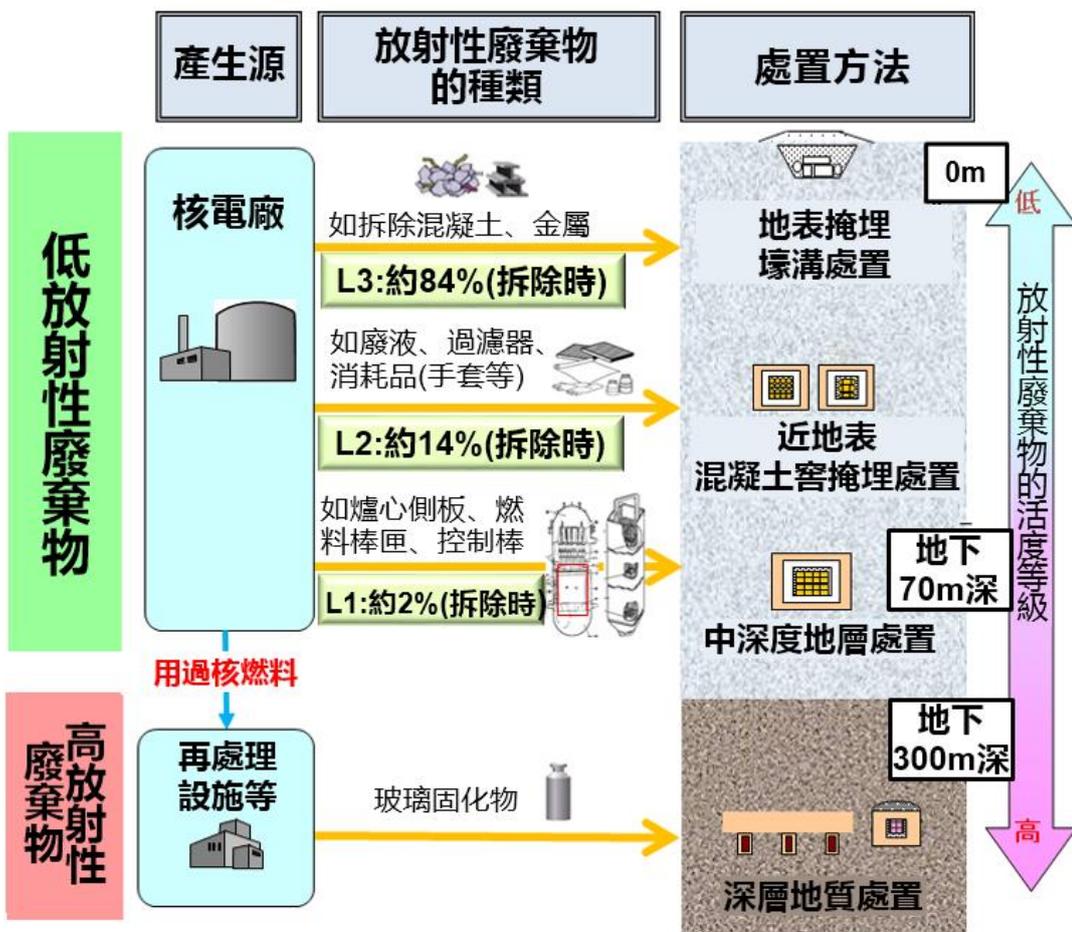


圖 5-9 L1~L3 廢棄物的處置方法[20]

(一) JPDR 活度極低廢棄物掩埋處置驗證實驗

此為日本首次以壕溝處置(TRENCH)方式，針對活度極低廢棄物(或稱 L3 廢棄物：活度略高於解除標準)進行淺地層的簡單掩埋²。該掩埋設施預計於 2025 年進行除役，即掩埋階段開始後的 30 年。這將是日本首次對低放(L3)廢棄物掩埋設施進行除役。

- 掩埋作業實施期間：1995 年 12 月~1996 年 6 月
- 掩埋總重量：1,670 噸混凝土(生物屏蔽混凝土 1,310 噸、除污混凝土 360 噸)
- 管理期間：約 30 年(掩埋階段包含上層覆土穩定期約 2 年、安全管理階段約 28 年)



圖 5- 10 JPDR 活度極低廢棄物掩埋處置驗證實驗-1[18]

² 地表掩埋壕溝處置的管理期間最久不超過 50 年，待管理期結束後，可作為一般土地使用。

掩埋階段（約 2 年）：設定為「管制區」、「周邊監測區域」，管制人員進出、監測地下水位及地下水中放射性物質濃度、巡視檢查等。

安全管理階段（約 28 年）：設定為「掩埋管理區」、管制或禁止該區域內進行農耕等特定行為、巡視檢查、定期安全檢查、必要時測量地下水及土壤的活度。

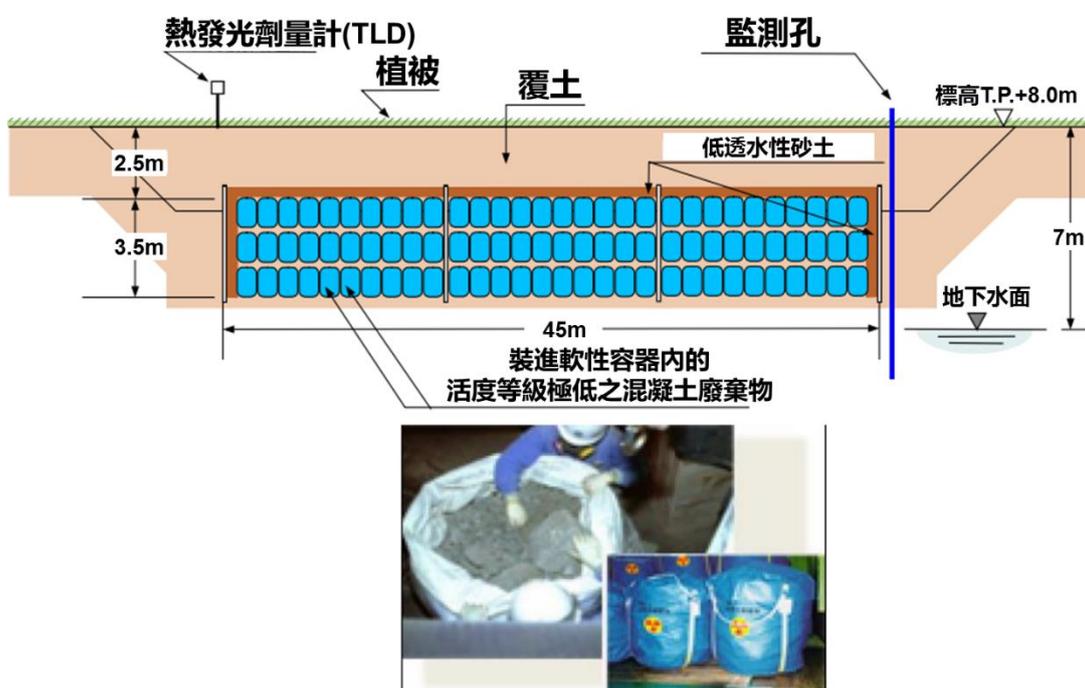


圖 5- 11 JPDR 活度極低廢棄物掩埋處置驗證實驗-2[18]

JPDR 拆除廢棄物中，根據詳細的調查及評估結果，有 20,670 噸可視為非放射性廢棄物，約占拆除廢棄物總量的 85%。非放射性廢棄物(Non radioactive Waste, NR)：根據履歷記錄、放置狀況等記錄確認沒有因放射性物質的附著或滲透

而造成的二次污染，或設施結構上有受到充分屏蔽而顯然不需考慮中子活化的影響，則可分類為「非放射性廢棄物」。

解除管制(Clearance)：核電廠運轉及拆除期間產生的放射性廢棄物中，針對放射性濃度極低，對人體健康幾乎沒有影響的廢棄物，經國家許可及確認後，可作為一般廢棄物進行再利用或處置。日本於 2005 年引進此制度。

因廠房拆除產生的非放射性混凝土約為 18,600 噸。其中，約有 6,000 噸的非放射性混凝土藉由再生處理機粉碎處理後作為再生材料應用於廠房窪地的回填；剩餘的非放射性混凝土則有效利用作為原子力研究所廠址內道路鋪面及建築物地下結構的基礎材料等；金屬廢棄物則轉為能夠有效再利用的廢料，盡可能將非放射性廢棄物作為資源再利用。



圖 5-12 經粉碎處理後之非放射性混凝土窪地回填作業[16]

三、 拆除廢棄物管理

依據 JPDR 拆除廢棄物管理的經驗，根據拆除現場不斷變化的狀況，確保拆除現場附近有足夠的空間用以安全臨時存放拆除產生的放射性廢棄物，這是很重要的。由於暫存的對象是放射性廢棄物，因此依據管制區的條件設置該臨時暫存場所，這在安全上是很重要的。

四、 工作人員曝露劑量

由於 JPDR 拆除實驗在制定計畫時已充分考量使工作人員的輻射曝露減到最少，且高活度的壓力槽內部結構物及壓力槽拆除作業採用遠端操作並於水中進行。因此從結果來看，工作人員集體劑量為 306 人·mSv；個人累積最大曝露劑量為 8.5 mSv，顯示人員所接受到的輻射劑量是非常低的。

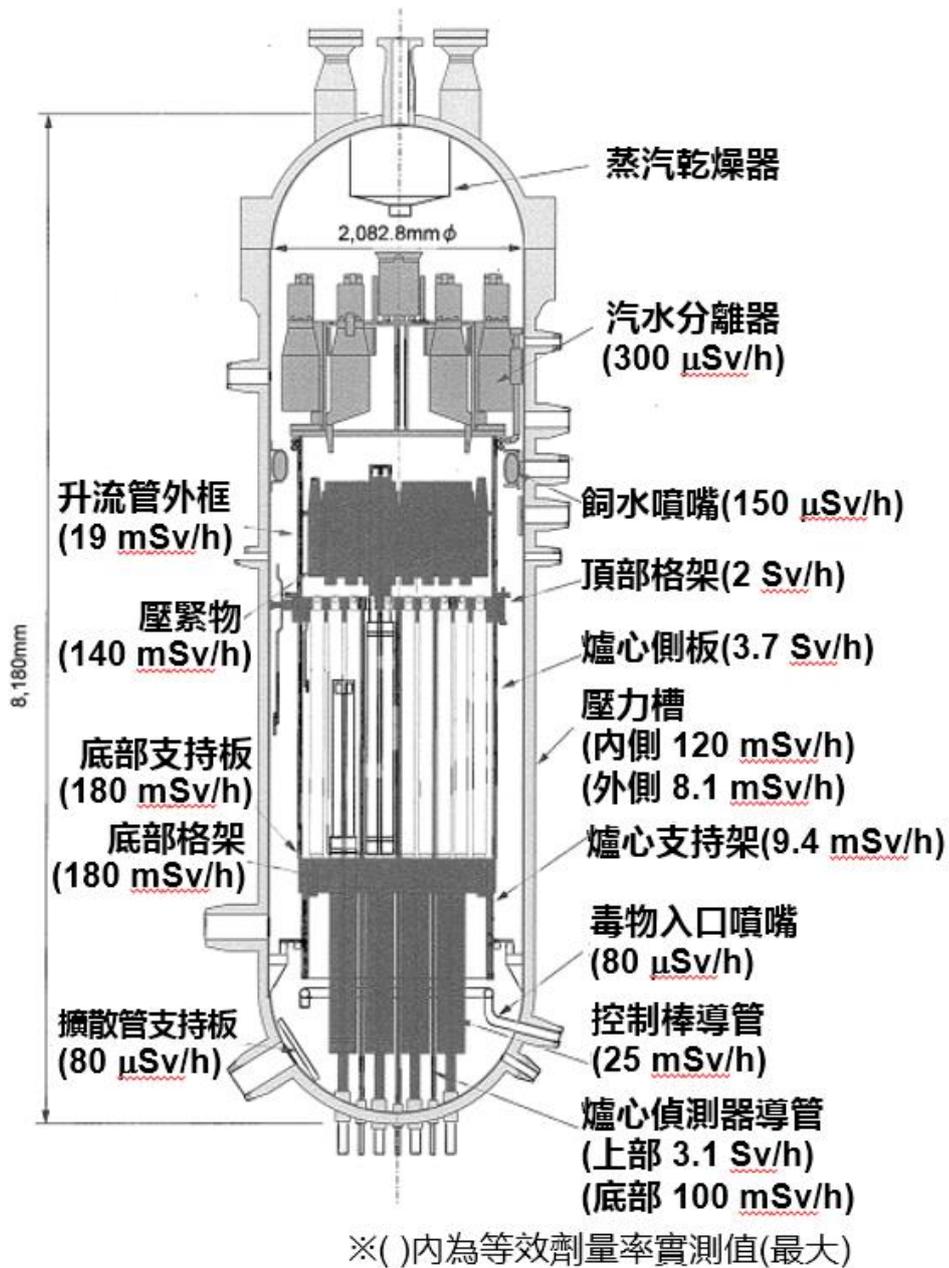


圖 5-13 JPDR 壓力槽內部結構物的表面等效劑量率[17]

工作人員受到曝露的大部分(90%)是來自壓力槽內部結構物及壓力槽等活化設備及組件的拆除作業，雖然採用遠端操作方式，但在進行相關周邊作業時反而容易受到曝露，例

如：遠端操作裝置在拆除前的準備作業或廢棄物處理廠房的污泥處理作業等。儘管遠端操作能夠安全切割及拆除高活度的壓力槽內部結構物及壓力槽，但更重要的是如何減少人員在周邊作業（如遠端拆除事前準備作業、污泥處理作業等）中的曝露。個人接受曝露劑量最多的是在壓力槽與生物屏蔽之間設置圓桶水槽的作業(5mSv)，以便於水中切割壓力槽。

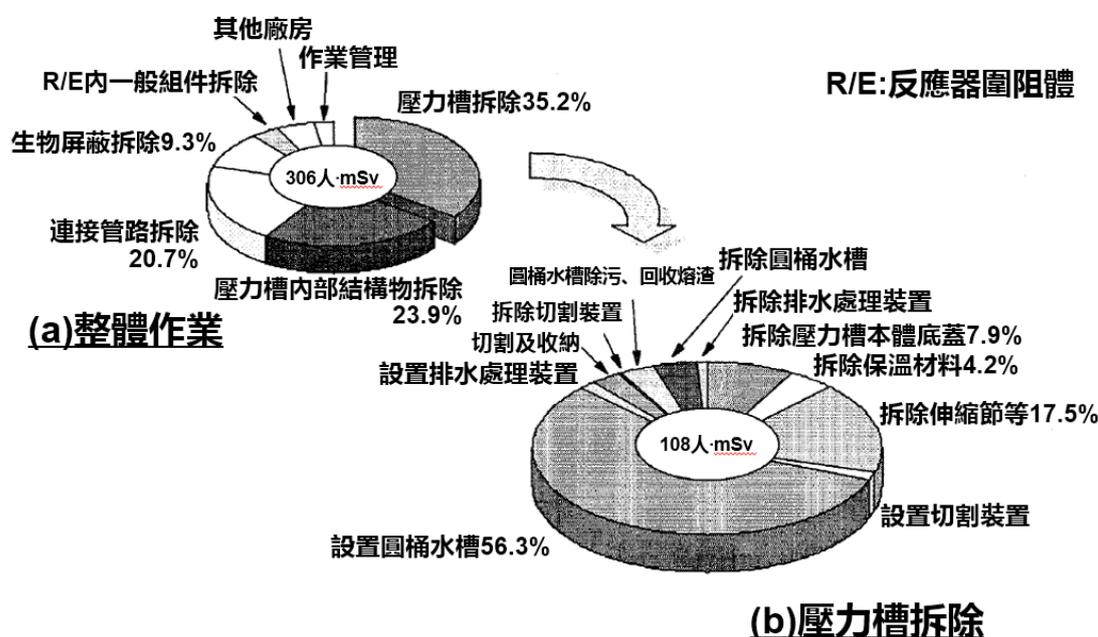


圖 5-14 工作人員曝露劑量占比[7]

五、 除污作業

確立了高活化物及設備拆除後所進行的除污、確認偵檢作業程序，並將廠房拆除後產生的大量混凝土以非放射性廢棄物方式處理。除污作業方面，則能根據除污對象表面、除污深度，適時選擇各種除污裝置，有效率進行除污作業。除

污裝置中有些只能應用於光滑的地面，因此無法使用於某些設備基礎。此外，使用壓縮空氣作為動力的裝置或回收磨料的裝置，在某些情況下亦可能導致污染擴散或產生大量二次廢棄物。有鑑於此，將來需要開發一種不用壓縮空氣或磨料，即可對各種形狀的表面進行大範圍除污的裝置。

六、 廠房拆除

在廠房方面，同時完成了廠房混凝土結構及埋設管路的拆除。由於此次作業中耗費了大量時間在拆除埋設管路，因此為了除役效率，再次體認到不將受污染管路埋設在混凝土內，以及預先統一管路路徑的重要性。

七、 對安全性的考量

應通盤考量拆除計畫（包括從準備作業到後處理作業）並減少工作人員從事輻射作業的次數。必要時，使用多功能遠端拆除裝置，以減少工作人員輻射曝露。藉由防爆墊等成功降低了爆炸產生的爆風壓力。爆破拆除是一種相對安全且有效率拆除設備及混凝土結構的方式。藉由水中切割及氣簾 (Air Curtain)（防止污染擴散的密閉設備）的使用，能夠減少工作環境中產生的放射性粉塵。但為了充分發揮氣簾的性能，應從安全的角度進一步研究放射性粉塵的特性及氣簾的處理能力等。

八、 廢棄物對策

機械切割及水刀切割方面，使用過的水及磨料應盡可能再利用，以減少放射性廢棄物產生量。生物屏蔽的拆除過程中，由於氫會從產生的污泥中轉移到水中，因此有必要儘早處理污泥。每個遠端拆除設備均有其附屬設備，但為了減少二次廢棄物，應共享設備。電弧圓盤鋸切割時使用的排水處理裝置效果良好；但電漿弧切割時用於回收浮渣及掉落熔渣的裝置卻效果不佳，有必要準確掌握熔渣特性並改善其處理方法及處理能力。

九、 提高作業效率

藉由對活度總量的準確評估，能夠依照活度等級對廢棄物進行分類。在進行拆除作業之前，有必要充分調查及分析設施內存在的放射性活度。遠端拆除作業方面，充分掌握拆除設施內的設備及結構物等相關資訊是很重要的。為有效率執行遠端拆除作業，在實際開始作業之前，有必要藉由操作訓練以提高操作人員熟練度，或開發一種不需此類訓練的簡易操作方法。遠端拆除裝置的實際應用方面，有必要開發一種能夠適用於各種不同切割物狀況的多功能裝置。進行多個遠端拆除作業時，有必要檢視準備及後處理等重複性的作業以制定工作計畫，使拆除作業能夠連續進行。準備及後處理

作業應包括以下工作項目：

- 準備作業：使用塑膠膜防護作業區、設置 Green House、活度偵檢、搬入切割裝置及貯存容器、設置拆除所需的設備、設置屏蔽板、調查作業區狀況等。
- 後處理作業：在切割及收納作業完成後拆除裝置及設備等、移出拆除物、整理作業區(除污、活度偵檢)等。

在實際使用本計畫所開發的遠端拆除裝置之前，雖然有取得設備的各種數據並據以審視工作計畫，但模型試驗仍然是需要且有效的。電漿弧切割方面，由於可在不同地方各別進行設備的粗部切割及細部切割(作業平行化)，同時簡化了細部切割的動作，從而提高了切割作業的效率。

表 5-1 從拆除實驗中汲取的經驗[7]

■ 對安全性的考量	
1	遠端作業的有效性 <ul style="list-style-type: none">● 在減少工作人員的輻射曝露方面是有效的
2	爆破工法的安全性 <ul style="list-style-type: none">● 在聚能裝藥中使用緩衝材是有效的● 在控制爆破中使用防爆墊、防爆毯是有效的
3	放射性粉塵特性評估的重要性

	<ul style="list-style-type: none"> ● 進行水中電漿弧切割時，使用氣簾是有效的
<p>■ 廢棄物對策</p>	
1	<p>水的處理</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 機械切割時的鋸片冷卻及水刀切割均會產生大量的水 ● 生物屏蔽拆除過程中，氫會從產生的污泥中轉移至水中
2	<p>減少二次廢棄物</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 水刀切割所使用的大量磨料 ● 電漿弧切割時所使用的可剝漆是有效的 ● 遠端拆除裝置有許多附屬設備
3	<p>評估熔渣特性的重要性</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 本次在電漿弧切割時所使用的水中浮渣及掉落熔渣回收裝置的效果不佳 ● 電弧圓盤鋸切割時使用的排水處理裝置效果良好
<p>■ 提高作業效率</p>	
1	<p>設施資訊的重要性</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 使用小型攝影機將電漿炬定位到切割位置是有效的 ● 圓盤刀具切割時，無法事先確認管路焊接部的毛邊 ● 根據活度總量對廢棄物進行分類是有效的
2	<p>作業的重複性</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ● 電漿弧切割、電弧圓盤鋸切割均需要進行準備及後處理作業
3	<p>裝置的多功能性</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 水刀切割方面，需要能簡單定位的方法 ● 圓盤刀具切割方面，需要多用途的管路支撐架，以配合不同的切割位置 ● 電弧圓盤鋸切割、機械切割及其周邊作業均需要遠端操作
4	<p>模型試驗</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 已解決電漿炬操作的問題 ● 已解決電弧圓盤鋸於垂直切割時的問題
5	<p>平行作業是有效的</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 使用刀式切割機及既有鑽孔機進行鑽孔 ● 電漿弧切割作業採用一次切割及二次切割

十、 拆除成果總結

經過第一階段《研發拆除技術》及第二階段《拆除實驗》後，得到的成果彙整如下：

1. JPDR 拆除作業在採用適當的拆除技術及輻射管理下，確保了工作人員的安全（總等效劑量約為 306 人·mSv）並完成了反應器的拆除。拆除期間無出現輻射

異常情形，對環境無造成任何影響。

2. 建立了活度總量評估、活度偵檢技術。瞭解活度量及其對象設備是很重要的，因為這是在規劃及審查反應器拆除計畫時所需要的基本依據。經確認後，得知大部分的活度集中在壓力槽內。
3. 已證實壓力槽內部結構物、壓力槽等可利用電漿弧切割工法等進行拆除。特別是水中遠端遙控技術應用方面，能夠大幅減少人員的輻射曝露，並對電弧切割產生的粉塵發揮抑制效果。
4. 在生物屏蔽拆除方面，使用了機械切割、水刀切割及控制爆破技術，並證實了這些工法的可行性。尤其是控制爆破技術展現了很高的拆除效率。此外，也有其他國家使用線鋸的方式，在考量活度等級、拆除物大小及結構等因素下，一般認為這些技術的組合運用是有效的。
5. 經由混凝土地面污染狀況調查得知，在一次側冷卻水滲漏位置的滲透污染深度為： ^{60}Co 僅數 mm； ^{137}Cs 則在十幾 mm 以內。根據這些數據已經能夠分離及去除被放射性活度污染的部分。廠房建築物拆除方面，則適用「非放射性廢棄物」的概念，並確立了以下作

業程序：利用污染狀況調查、混凝土表面除污及活度確認偵檢，在確認無污染後，使用既有工法完成了廠房拆除。

6. 對於拆除產生的放射性廢棄物，則根據活度濃度、污染等級及材料等加以分類，並採用了管理系統，以便將來進行處理、處置。從結果來看，大部分的放射性廢棄物其活度等級都很低。其中，活度等級極低之混凝土廢棄物則用於掩埋實驗，並實證了簡單掩埋的處置方式。同時也體認到將來需要建立一個更加合理的廢棄物管理系統（包括法規豁免及再利用標準）。
7. 除污技術方面，建立了拆除前系統除污及拆除後廢棄物除污的基本技術。
8. 開發了評估軟體及資料庫，能夠在拆除前預測及評估放射性廢棄物的產生量、所需作業人數、人員的曝露劑量等，以利制定拆除計畫。這些評估軟體系統在研擬合理的除役方法上是不可或缺的，但仍需進一步改進及維護。
9. 對於拆除產生的放射性廢棄物，則根據活度濃度、污染等級及材料等加以分類，並採用了管理系統，以便將來進行處理、處置。從結果來看，大部分的放射性

廢棄物其活度等級都很低。其中，活度等級極低之混凝土廢棄物則用於掩埋實驗，並實證了簡單掩埋的處置方式。同時也體認到將來需要建立一個更加合理的廢棄物管理系統（包括法規豁免及再利用標準）。

10. 除污技術方面，建立了拆除前系統除污及拆除後廢棄物除污的基本技術。
11. 開發了評估軟體及資料庫，能夠在拆除前預測及評估放射性廢棄物的產生量、所需作業人數、人員的曝露劑量等，以利制定拆除計畫。這些評估軟體系統在研擬合理的除役方法上是不可或缺的，但仍需進一步改進及維護。

陸、 今後課題

一、 依據 JPDR 拆除經驗的課題

JPDR 拆除計畫為拆除反應器本體設備及組件開發了各種拆除工法及拆除設備。這些拆除工法及拆除設備，在 JPDR 拆除過程中充分發揮了作用，其有效性亦獲得驗證。

使用這些開發的拆除工法及拆除設備、既有工法等成功拆除了 JPDR 所有設施及設備之後，證明所開發的拆除工法同樣也可應用於其他反應器設施的設備及組件拆除上。

因此，根據 JPDR 拆除實驗中所得到的經驗與知識成果，預期將來商用反應器設施除役時可能面臨的課題，需要開發或採用以下技術予以解決：

1. 提升切割性能

在拆除壓力槽內部結構物時，需要切割 300mm 厚度的不鏽鋼結構物。假設從兩側進行切割，則有必要開發一種技術能夠在水中確實切割 150mm 厚度的不鏽鋼結構物。

2. 開發遠端操作機器人

有必要開發一種能夠在高等效劑量率的水下環境中，對切割設備進行遠端操作的控制技術，以及能夠操作各種切割設備的多功能機器人。

有必要開發一個能夠自動完成一系列任務的操作系統，包括從抓取、移動並將其放入收納容器內的動作。

3. 減少輻射曝露的對策

從減少人員輻射曝露、減少放射性廢棄物量及降低成本的角度來考量，以下項目可作為其對策：

- 為降低等效劑量率及防止空氣污染擴散，在拆除壓力槽內部結構物及壓力槽時，應採取水中切割工法，並設置氣簾裝置、使用具有廢水處理裝置的水淨化系統。
- 拆除時使用的切割設備應盡可能專用。
- 利用聚能裝藥切割壓力槽連接管時，貫穿管路周圍生物屏蔽塊維持不拆，從生物屏蔽外側進行管路切割，並採取防止碎片噴出及粉塵擴散的措施，對減少輻射曝露是有效的。
- 為了使壓力槽能在水中切割，可考慮使用熱屏蔽(BWR)或生物屏蔽(PWR)將反應器井圍成水槽使用。

二、 今後的課題

JPDR 雖已順利拆除完成，但也留下一些課題有待解決：

1. 反應器周圍區域的拆除工法

遠端拆除技術及水中切割工法已被用於高活度結構物的拆除，該方法雖有助於人員的輻射防護及防止污染物的擴大，但仍有許多作業是必須接近反應器周圍區域才能進行的，例如壓力槽表面隔熱材料、穩定器、伸縮節等的拆除作業、壓力槽拆除前的圓筒水槽安裝作業、壓力槽連接管路的切割作業等。此外，也有些準備作業必須在壓力槽內沒有水的狀態下進行。因此將來有必要特別從輻射防護的角度來研究反應器周圍區域（包含壓力槽等）的拆除作業工法。

2. 研發多功能遠端機器人

所開發的各種技術在切割高活度結構物，並將其安全收納於容器中的作業方面，能夠有效減少工作人員的輻射劑量及活度污染。然而，在實證實驗時對不同的拆除對象採用了不同的遠端裝置，而這些遠端裝置在現場組裝、安裝、調整及拆除上卻花費了大量的時間及勞力，有待進一步改良。

3. 明確訂定豁免管制的標準值

結束用途的反應器設施可說是一座大型廢棄物，其中放射性廢棄物只占一部分，其他大部分幾乎均

為不需作為放射性廢棄物處理的廢棄物。考量自然界中也普遍存在不會對安全構成問題的天然放射性物質，因此將活度等級低於標準值以下的放射性物質排除在輻射安全管制之外，並將其視作「非放射性廢棄物」處理是極為重要的。該標準值的明確化將極大程度地影響拆除方式及廢棄物處理措施。

4. 提升大範圍活度偵檢的作業效率

拆除廠房時，必須確認混凝土表層剝離除污後是否已無放射性？由於其表面積非常大，即使 JPDR 這種小型動力實驗爐也有 2 萬平方公尺，因此這項作業需花費相當多的測量時間及勞力，有待進一步提升作業效率。

5. 對拆除廢棄物的合理措施

從拆除廢棄物的整體數量來看，雖然放射性廢棄物的占比很小，但與反應器設施運轉期間產生的廢棄物相比，仍是在短時間內產生了巨大的數量。這些低活度等級廢棄物的處理、處置及資源化是今後極為重要的課題，需要考量環境淨化及資源節約以制定合理的措施。目前（1995 年）日本原子力研究所（現為原子力研究開發機構：JAEA）正在規劃廢

棄物的安定及減容的處理技術。

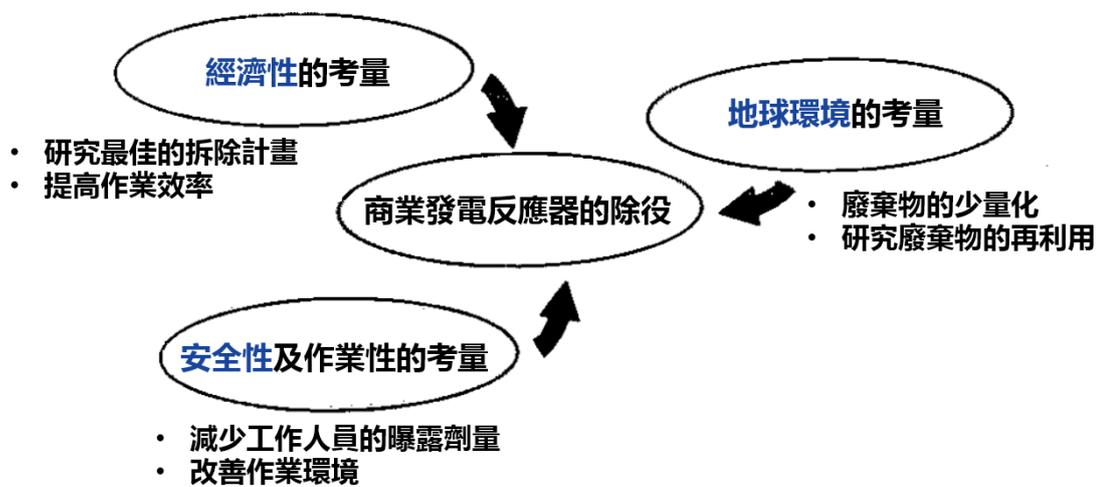


圖 6-1 未來商業發電反應器除役的基本概念[10]

柒、 管制建議

JPDR 拆除經驗顯示，能夠在現有技術的組合下，完成反應器拆除。參與拆除計畫相關人員的一致看法是：成功的關鍵在於「計畫管理(PM: Project Management)」，而非技術因素。

借鏡 JPDR 成功的拆除經驗，提出以下幾點管制建議：

1. 確保廢棄物的去向（存放地點、處理、貯存、處置）

若在拆除廢棄物的去向問題上未有定論，則可能導致除役進度停滯，對除役期程造成影響。國內核電廠的廢棄物規劃在電廠內部進行除污偵檢作業，存放地點及處理並無問題；但貯存及處置地點尚未取得共識，有待繼續努力，方能順利在期程內完成除役任務。

2. 專案管理（很重要）

理想的執行團隊需要均衡整合計畫管理能力、對電廠設施的知識及除役技術能力等三要素。國內電廠人員對所轄設施的知識在廣度及深度上均無疑問，但人員的離退情況持續發生，人才斷層問題值得重視；另一方面，由於缺乏實際除役經驗，在除役計畫管理及技術能力方面，有待藉助國際顧問公司或電廠的技術或經驗，方能順利完成專案管理。

3. 整體最佳化

針對「拆除~處理~運送~處置」之流程，考量整體最佳化。

4. 詳細的除役前特性調查

除役前特性調查做得越詳細則越能清楚掌握現場狀況，有利於拆除作業執行。

5. 現場原則

重視現場需求，結合獲得實證的技術。

6. 適當彈性的管制

應隨著除役作業的進展，根據輻射及作業風險程度變化，適當彈性的安全管制。

核電廠除役不只是電廠的責任，也是政府（管制單位）需共同面對的課題。為使民眾安心並保障民眾健康安全，除役時需做到「有效果且有效率」，即最佳化。

電廠方面應制定確實的管理計畫，並配合管制單位根據除役風險等級變化所實施的安全管制，對低放廢棄物以有效果且有效率的方法進行處理及處置。

捌、 参考文献

- [1] https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/decommissioning/01/decommissioning_01_01.html
- [2] 助川武則・畠山睦夫、JPDR における内蔵放射能評価について、デコミッショニング技報、1993 年 6 月、第 8 号
- [3] <https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/05253/>
- [4] 清木義弘・柳原敏・立花光夫、JPDR 解体実地試験—JPDR 設備・機器の解体—、デコミッショニング技報、1996 年 12 月、第 15 号
- [5] 阿部昌義・仲田進・伊東慎一、JPDR 解体実地試験—JPDR 解体廃棄物の管理—、デコミッショニング技報、1996 年 12 月、第 15 号
- [6] 宮坂靖彦、JPDR 解体プロジェクトの概要と成果、デコミッショニング技報、1996 年 8 月、第 14 号
- [7] 立花光夫・白石邦生・柳原敏、動力試験炉の遠隔解体作業から得られた知見、日本原子力研究所、2001 年 3 月
- [8] 横田光雄、原子炉における解体、日本ロボット学会誌、1995 年、Vol.13、No.4
- [9] <https://energy-forum.co.jp/online-content/9641/>

- [10]宮坂靖彦・渡辺正秋・田中貢・中村寿・清木義弘・立花光夫・小澤一茂・畠山睦夫・伊東慎一・吉森道郎・富居博行・中村清宣・柳原敏・白石邦生・藤木和男、JPDR 解体実地試験の概要と成果、日本原子力研究所、1996年6月、Vol.38、No.7
- [11]宮坂靖彦、JPDR デコミッショニング —解体実地試験に至る経緯とその概要—、デコミッショニング技報、1994年6月、第10号
- [12]清木義弘・小澤一茂、JPDR 解体実地試験—放射線遮蔽体の解体撤去—、デコミッショニング技報、1996年8月、第14号
- [13]清木義弘・久保隆司、JPDR 解体実地試験—原子炉格納容器等の解体撤去—、デコミッショニング技報、1996年8月、第14号
- [14]田中貢、原子力施設の解体技術の開発—JPDR 解体実地試験の完了、日本機械学会誌、1997年1月、Vol.100、NO.938
- [15]柳原敏、環境とリサイクルにおける未解決問題—原子力施設の合理的な廃止措置に向けて—、日本機械学会誌、1997年11月、Vol.100、NO.948
- [16]https://www.jaea.go.jp/04/ntokai/decommissioning/01/decommissioning_01_01.html

- [17]白石邦生・助川武則・柳原敏、動力試験炉（JPDR）の解体における作業被ばく線量の分析、日本原子力研究所、2001年11月
- [18]日本原子力研究開発機構における廃止措置の現状と課題、日本原子力研究開発機構、2022年8月31日
- [19]佐藤忠道、原子力施設の廃止措置の現状と課題、原子力バックエンド研究、Vol.23 No.1
- [20]https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/gaiyo/gaiyo01.html