

核能安全委員會
委託研究計畫研究期末報告(定稿版)

114 年國際核電廠除役反應器壓力槽拆除實務蒐集及管制研究
2025 Research on Decommissioning Practices and Regulatory Control for
Dismantling Reactor Pressure Vessel of international nuclear power plants

計畫編號：NSC11402014L

受委託機關(構)：國家原子能科技研究院

計畫主持人：劉上銘

共同主持人：江崑輝、秦蔚宗

研究期程：中華民國 114 年 4 月至 114 年 12 月

研究經費：新臺幣 139 萬 1 千 6 百元

核安會聯絡人員：林子桀

核備日期：114 年 12 月 15 日

摘 要

我國核能電廠陸續進入停機除役階段，其中核一廠即將邁入除役拆廠階段，重要機組與周邊設備將陸續開始進行拆除作業，拆除管制作業涉及多項技術且過程繁複，需要持續藉由參考國際核電廠管制經驗、參酌國外管制單位管制執行方式，強化管制技術，使核安管制能更臻完善；本報告依據「114年國際核電廠除役反應器壓力槽拆除實務蒐集及管制研究」計畫，將計畫項目分為2個子項計畫，包括國外核能電廠除役作業相關工程管理作法資訊蒐集與研析、國外核電廠反應器壓力槽之拆除作業管制作法與經驗等管制技術相關資料進行蒐集與探討，經由研析國外有經驗之先進國家法規、案例與報告等資料，可提供建議交由國內管制單位參考，以提升我國核電廠在除役作業的安全性和管制方面的深度，有助於正在執行的核設施與設備拆除等相關作業時，能夠確保電廠設施、民眾與周圍環境等各方面的安全。

關鍵字：除役拆廠階段、除役管制文件、除役拆除作業、反應器壓力槽

國家原子能科技研究院

目錄

1. 前言.....	1
2. 國際核能電廠除役管制文件及工程管理案例研析	2
2.1 緣由及內容概要.....	2
2.2 研析背景資料.....	3
2.2.1 日本研析計畫回顧.....	3
2.2.2 日本原子力規制委員會 (NRA)	6
2.2.3 日本核電廠營運概況.....	11
2.3 除役管制文件與工程管理.....	14
2.3.1 除役管制文件.....	14
2.3.2 工程管理.....	15
2.3.3 除役階段劃分.....	16
2.3.4 除役階段實際案例.....	18
2.3.5 作業安全管理.....	29
2.3.6 人員進出管制.....	30
2.4 廢棄物分類與處理.....	32
2.4.1 廢棄物分類.....	32
2.4.2 放射性廢棄物種類與可能處理方式	34

2.4.3	解除管制制度(クリアランス制度).....	35
2.4.4	放射性廢棄物處置設施.....	37
2.4.5	放射性廢棄物處置實例.....	39
2.5	管制建議.....	42
2.5.1	管制要項建議.....	42
3.	國際核電廠除役期間 RPV 拆除作業等關鍵要項與技術資訊實例研究 .	45
3.1	緣起與內容概要.....	45
3.2	國際核電廠反應器壓力槽拆除案例經驗	45
3.2.1	常見 RPV 拆解技術優缺點.....	46
3.2.2	Connecticut Yankee 核電廠.....	47
3.2.2	Vermont Yankee	50
3.2.3	José Cabrera 核電廠	54
3.3	反應器壓力槽拆除案例-KKB 核電廠除役及拆除安全報告	60
3.3.1	除役概要.....	60
3.3.2	工作區域、拆除程序和設施.....	63
3.3.3	設施拆除	66
3.3.4	放射性廢棄物處理.....	73
3.3.5	輻射防護.....	74
3.3.6	事件分析.....	77

3.4 反應器壓力槽拆除案例-KKB 核電廠除役及拆除許可安全評估報告	79
3.4.1 審查標準.....	80
3.4.2 設施拆除審查結果.....	82
3.4.3 輻射防護審查結果.....	89
3.4.4 放射性廢棄物處理審查結果.....	93
3.4.5 事件評估審查結果.....	94
3.5 KKB 反應器壓力槽拆解現況.....	95
3.6 管制建議.....	101
4. 結論.....	104
參考文獻.....	106

附圖目錄

圖 2.1：日本核安監管系統的變化(圖片來源：日本原子力文化財團網站)..7	
圖 2.2：日本 NRA 組織圖(圖片來源：日本 NRA 網站)..... 10	
圖 2.3：東海核電廠除役期程(摘自 JAPC 網站)..... 19	
圖 2.4：東海核電廠除役第一階段示意圖(摘自 JAPC 網站) 20	
圖 2.5：東海核電廠用過核燃料冷卻池清理排水(摘自 JAPC 網站) 21	
圖 2.6：東海核電廠渦輪機建築區設備拆除(摘自 JAPC 網站) 21	
圖 2.7：東海核電廠第二階段示意圖(摘自 JAPC 網站)..... 22	
圖 2.8：東海核電廠熱交換器等的拆除工作(摘自 JAPC 網站) 22	
圖 2.9：東海核電廠第三階段示意圖(摘自 JAPC 網站)..... 23	
圖 2.10：東海核電廠反應器爐體拆除順序示意圖(摘自 JAPC 網站) 23	
圖 2.11：東海核電廠第四階段示意圖(摘自 JAPC 網站)..... 24	
圖 2.12：東海核電廠除役時程變更示意圖(摘自 NRA 網站) 25	
圖 2.13：濱岡核電廠除役時程變更示意圖(摘自中部電力公司網站)..... 29	
圖 2.14：放射性廢棄物種類及處理方式(摘自核能與能源圖面集網站)..... 35	
圖 2.15：解除管制制度概要(摘自核能與能源圖面集網站)..... 37	
圖 2.16：低放射性廢棄物埋設構造示意圖(摘自核能與能源圖面集網站).. 38	
圖 2.17：高放射性廢棄物貯存構造概念圖(摘自核能與能源圖面集網站).. 39	
圖 2.18：各類廢棄物比例圖(摘自中部電力網站)..... 40	
圖 2.19：各類廢棄物處理流程示意圖(摘自中部電力網站)..... 41	
圖 3.1：Connecticut Yankee 核電廠..... 49	
圖 3.2：遙控機器手臂：Grant Machine..... 49	
圖 3.3：池中過濾設備 50	

圖 3.4：Vermont Yankee 核電廠	52
圖 3.5：汽水分離器切割作業(1)	52
圖 3.6：汽水分離器切割作業(2)	53
圖 3.7：汽水分離器護罩上部移除作業	53
圖 3.8：José Cabrera 核電廠	56
圖 3.9：反應器壓力槽及內部組件廢棄物劃分	56
圖 3.10：CE-2A、CE-2B 容器與 MPC 容器	57
圖 3.11：西屋驗證設施現場	57
圖 3.12：潛水員執行洩漏緊固作業	58
圖 3.13：上部組件護套管切割作業	58
圖 3.14：上部爐心筒壁切割示意圖	59
圖 3.15：反應器壓力槽吊運作業	59
圖 3.16：反應器壓力槽與廢棄物容器及切割件	60
圖 3.17：KKB 核電廠除役時程	62
圖 3.18：KKB 反應器廠房剖面圖	71
圖 3.19：KKB 反應器廠房 A10 層俯視示意圖	71
圖 3.20：儲存池與沉澱池工作區和反應器壓力槽拆解作業區示意圖	72
圖 3.21：包裝區、拆解設備及過濾設備的示意圖	72
圖 3.22：放射性廢棄物分類	74
圖 3.23：廢棄物預估產量	74
圖 3.24：反應器壓力槽頂蓋切割規劃示意圖	96
圖 3.25：工作人員切割反應器壓力槽頂蓋	97
圖 3.26：切割件裝入 IP2 貨櫃待後續熔煉作業	97
圖 3.27：水下切割機器人 AZURo	98

圖 3.28 : Konrad-Container.....	99
圖 3.29 : 使用水平鋸拆解錘頭螺栓(用於固定汽水分離器).....	99
圖 3.30 : 汽水分離器吊離反應壓力槽與後續於沉澱池進行切割作業	100
圖 3.31 : 利用水下液壓剪將中子通量測量探管拆解.....	101

附表目錄

表 2-1：日本核設施除役研析系列計畫概要	5
表 2-2：日本營運中核電廠統計表(摘自日本原子力產業協會網站)	11
表 2-3：日本建設中核電廠統計表(摘自日本原子力產業協會網站)	12
表 2-4：日本計畫中核電廠統計表(摘自日本原子力產業協會網站)	12
表 2-5：日本除役核電廠統計表(摘自日本原子力產業協會網站)	13
表 2-6：日本廢棄物分類表(摘自核能與能源圖面集網站).....	33
表 2-7：日本棄物數量概估表(摘自核能與能源圖面集網站).....	33
表 2-8：日本放射性廢棄物種類(摘自核能與能源圖面集網站)	34
表 2-11：管制要項建議.....	43

1.前言

依據「114年國際核電廠除役反應器壓力槽拆除實務蒐集及管制研究」計畫(簡稱本計畫)之目標，本計畫將研究項目分為2個子項計畫，包括國外核能電廠除役拆除作業相關工程管理作法資訊蒐集與研析、國外核電廠反應器壓力槽拆除作業管制作法與經驗等管制資料，本報告章節規劃係根據以上子計畫之研究項目而劃分，本計畫之工作項目分述如下：

- (1) 蒐集國際除役核能電廠拆除管制文件、法規與工程管理作法之技術報告及實務案例，如人員管制、作業安全及拆除廢棄物管理，與我國核電廠除役管制作法進行比較，彙整後提供管制建議。
- (2) 蒐集核電廠除役期間反應器壓力槽，其附屬結構、系統與設備拆除作業等關鍵要項與技術資訊，以及拆除作業過程中可能產生的安全性危害，評估我國適用作法加以研究分析，提供管制建議。

2. 國際核能電廠除役管制文件及工程管理案例研析

2.1 緣由及內容概要

我國核能電廠陸續停機進入除役階段，其中核一廠已邁入除役拆廠階段，重要機組與周邊設備將陸續開始進行拆除作業，在這過程中，拆除管制作業涉及多項技術且過程繁複，需要持續藉由參考國際核電廠管制經驗、法規、核能電廠除役管制文件、除役實務案例等相關資料，妥善了解除役作業所需面臨之技術與管理問題，並參酌國外管制單位管制執行方式，強化管制技術，使除役管制能更臻完善。

為確保我國除役作業能在安全情況下順利進行，對於拆除作業進行過程中所可能面臨的問題與困擾，經由廣泛的除役資料蒐集與討論，將是除役管制過程中重要的參考資料來源；尤其日本核電廠拆除作業經驗豐富，且與我國交流頻繁，自日本原子力研究所(JAEA)的動力實驗爐(Japan Power Demonstration Reactor, JPDR)反應器除役以來，雖目前僅完成 JPDR 的除役，但其他反應器也陸續開始進行除役作業，涵蓋各式反應器拆除技術、作業安全管理與廢棄物處理等，這些經驗對台灣核電廠除役作業而言，極具參考價值。

本節主要在蒐集日本核能電廠除役管制文件、法規與工程管理作法之技術報告及實務案例，如人員管制、作業安全及拆除廢棄物管理等，與我國核電廠除役管制作法進行比較，並彙整後提供管制建議參考，章節主要架構包含以下內容：

- (1) 研析背景資料簡介，包括日本核設施研析系列計畫之回顧、日本原子力規制委員會概述與日本核電廠概況。

- (2)介紹除役規劃管制文件、工程管理與人員進出管制。
- (3)介紹廢棄物分類與處理。
- (4)歸納管制關鍵要項與建議。

2.2 研析背景資料

2.2.1 日本研析計畫回顧

為了對日本核電廠除役曾研析的資料有清晰完整的輪廓，並避免對同樣資料投入重複的研究，本節主要在回顧本系列計畫中，自 109 年起在日本核電廠及核設施除役、拆除、長期停止營運作業管制等方面的研究，其研究概要如下：

- (1)109 年研究計畫：研究重點以日本核電廠除役相關規範為主，包括原子力學會(AESJ)所訂定的實施標準與相關技術報告(例如：NRA「除役計畫之核設施安檢施行要領」、NRA「商用及研究用反應器設施除役計畫書審查標準」等)，以瞭解日本在核電廠除役方面的相關法令規定與實施標準，計畫主要在相關資料的蒐集、彙整探討及管制要領。
- (2)110 年研究計畫：日本執行除役計畫中之濱岡核電廠 1、2 號機，其反應器型式與我國核一廠的反應器同為輕水沸水式反應器(BWR)，所以該廠在除役上的實際作業經驗和應用技術，有許多值得參考之處，因此，110 年研究計畫以濱岡核電廠之除役計畫申請及第一、二階段拆除作業，篩選其中與我國拆除作業可參考內容進行研究，彙整、分析其相關資料。
- (3)111 年研究計畫：日本原子力研究所(JAEA)的 JPDR (Japan Power Demonstration Reactor)是日本最初的發電用反應器，也是迄今唯

一完成除役的電廠，自 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，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資料。

(4)112 年研究計畫：本年度計畫主要以島根核電廠一號機長期停機之管理維護為研究標的。資料蒐集與分析重點以日本除役過程，核設施在長期停用狀況下，對於設施的維護相關資料為主，包括核燃料的貯存狀況與管理、除役期間反應器設施、用過燃料池的維護管理與相關設備性能的維持等，以瞭解日本核電廠停機過渡階段機組狀態的維護管理作法。

(5)113 年研究計畫：本年度計畫主要以日本核電廠在地震作用下因應用過燃料池中池水溢出的作為及後續處理為研究標的。整理日本核電廠在地震作用下受到的影響，並對於用過燃料池中池水溢出的狀況即時反應與之後的改善措施，了解進行改善後的結果，接著研析地震對於監測系統的影響以及防備機制，彙整相關資料，並提出管制參考建議，希望能更完善地震作用下核電廠的安全與監測、防備措施。

自 109 年起的日本核設施研析系列計畫概要介紹如上，為便於瞭解比較，綜合彙整其主要研究方向及簡要內容如表 2-1。

表 2-1：日本核設施除役研析系列計畫概要

年度	研究方向	內容概要	備註
109 年	日本核設施除役規範與作業標準	<p>(1).彙整日本 AESJ 核設施除役作業標準及其他技術報告。</p> <p>(2).探討日本採行的核設施除役規範及作業審查標準。</p> <p>(3).管制要項建議包括核燃料的貯存、設施與設備維護、輻射安全防護與管理、環境管制監測等。</p>	
110 年	日本濱岡核電廠除役申請與第一、二階段拆除狀況	<p>(1).濱岡核電廠除役計畫書申請，與後續修訂內容。</p> <p>(2).濱岡核電廠除役作業規劃。</p> <p>(3).濱岡核電廠第一、二階段拆除狀況。</p>	
111 年	日本 JPDR 拆除作業規劃與執行概要	<p>(1).JPDR 背景與概要。</p> <p>(2).JPDR 拆除計畫。</p> <p>(3).JPDR 拆除成果。</p> <p>(4).今後課題。</p> <p>(5).管制建議。</p>	
112 年	日本島根核電廠長期停機的運轉維護及管制實例	<p>(1).島根核電廠概要與 1 號機除役時程。</p> <p>(2).核子燃料的貯存狀況、管理與移出及轉讓。</p> <p>(3).除役期間反應器設施、用過燃料池的維護管理與相關設備功能、性能的維持及期間。</p> <p>(4).用過燃料池水位、水溫標準及貯存安全規定、安全對策與用過核燃料的貯存期長。</p>	

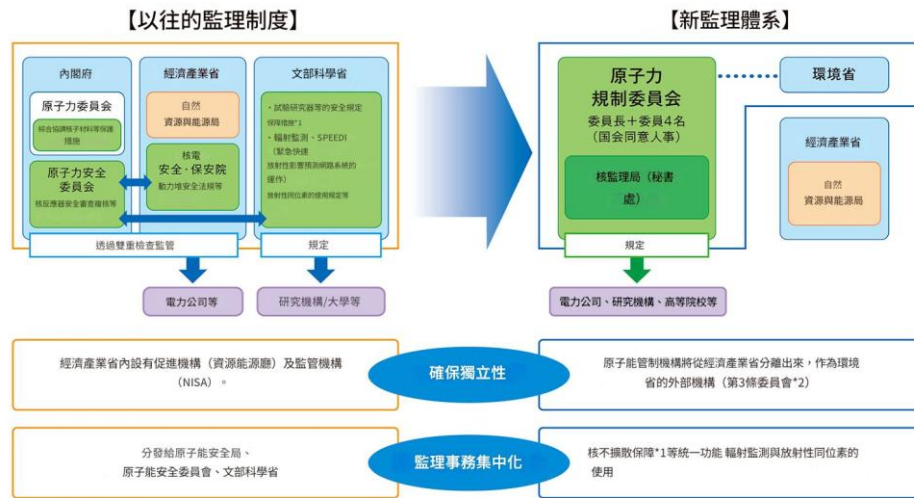
		(5).用過核燃料冷卻水喪失時的燃料完整性評估。 (6).管制關鍵要項。	
113 年	日本核電廠在地震作用下的影響與即時因應、後續改善實例	(1).日本 2004 年石川地震的受災情況，含規模、影響區域等。 (2).日本志賀核電廠震災情況與因應。 (3).日本柏崎刈羽核電廠震災情況與因應對策。 (4).日本志賀、柏崎刈羽核電廠的改善對策，與已經執行項目成果。 (5).彙整提出管制建議。	

2.2.2 日本原子力規制委員會 (NRA)

日本原子力規制委員會 (NRA) 是日本負責核能安全監管的核心機構，成立於 2012 年，乃是 2011 年在東電公司福島核電廠發生嚴重事故之後，對核能監管體制所進行的重大改革。

2011 年東北太平洋沿岸地震和海嘯造成東電公司福島第一核電廠發生嚴重事故，經檢討後決定改善原子能運用的監管機制，因此日本政府於 2012 年成立了原子力規制委員會 (NRA)，屬於環境省的外部組織，作為獨立監管機構，將核能運用的「推廣」和「監管」分開，集中處理監管事務，希望 NRA 基於專業知識和中立公正的立場，獨立公正地進行核安全監管工作；依據日本原子力文化財團(JAERO)網站^[1]所揭示，日本核安監管系統的變化如圖 2-1。

核安監理系統的變化



*1 為確保核材料僅用於和平目的而不被轉用於核武等而進行的核查活動。

*2 所謂的第3條委員會 (國家行政組織法第3條第2項規定的委員會) 是保證獨立行使職權的合議機構，不受上級機關 (例如設立該部門的部長) 的指示和監督。

圖 2.1：日本核安監管系統的變化(圖片來源：日本原子力文化財團網站)

在 2011 年福島第一核電廠發生事故之前，日本的核能方面監督管理等事務主要由以下機構負責：

- (1) 原子力安全保安院 (NISA) (隸屬經濟產業省 (METI))：負責核電廠的安全審查、檢查與許可，包括除役計畫。
- (2) 文部科學省 (MEXT)：負責核能研究設施與輻射安全。
- (3) 原子力安全委員會 (NSC) (隸屬於內閣府)：作為顧問機構，提供技術建議，但無直接監管權。

原先監管制度可能產生的問題，經檢討可大致歸納如下：

- (1) 監管與推廣混淆：NISA 隸屬於 METI，而 METI 同時也有所屬單位的業務範圍包括負責推廣核能，導致 METI 同時具有監管與推廣的權責，以至於 NISA 監管的獨立性不足。

(2)監管鬆散：福島事故發生前，NISA 對東京電力公司（TEPCO）的安全措施審查並不嚴格，且並未充分考量地震與海嘯等天災發生時的風險。

(3)資訊不透明：監管機構與電廠運營商之間的溝通資訊缺乏公開性，公眾的信任度較低。

2011 年日本大地震引發福島第一核電廠的嚴重事故，顯露出日本政府對核能電廠監管制度有重大問題，檢討改革的呼聲四起，為了記取福島事故的教訓並不再重蹈覆轍，日本政府於 2012 年進行核能監管體制的改革，乃有 NRA 的設立。

2012 年 6 月，日本國會通過「原子力規制委員會設置法」，廢除 NISA 與 NSC，設立獨立的 NRA。NRA 於 2012 年 9 月 19 日正式成立，隸屬於環境省，以確保監管獨立性，脫離 METI 的核能推廣職能。

NRA 設立後，為秉持設立時的使命，依據 NRA 網站所揭示，原子力規制委員會及其事務局將遵循以下原則來開展工作。

(1)獨立決策：從科學技術的角度出發，獨立自主地做出決策，不受任何約束。

(2)有效行動：摒棄形式主義，專注於本業，追求真正行之有效的監管。

(3)透明開放的組織：公開包括決策過程在內的相關資訊，傾聽國內外多元意見。

(4)進取心與責任感：持續學習最新知識，努力提升知能履行職責。

(5)緊急應變：迅速且有秩序地應對任何情況，將建立一套在意外發生時也能達成這目標的機制。

NRA 的主要權責包括以下各項：

- (1)制定與執行核能安全標準：制定並更新核能設施的安全規範，包括新規制基準等，涵蓋核電廠的設計、運轉、除役與輻射防護等方面。
- (2)審查許可與計畫：審查核電廠運轉、重啟、除役及核燃料設施的許可申請，包括除役計畫的技術與安全評估。
- (3)安全檢查與監督：對核設施進行定期（每季或每年）與非定期檢查，包括設備狀況、輻射監測、進出管制與廢棄物處理等。
- (4)緊急應變與事故調查：制定緊急應變計畫，監督、審核事故報告與調查，協調政府與國際機構（如 IAEA）間的事務。
- (5)廢棄物管理與環境監測：規範放射性廢棄物分級、貯存與處置，監督環境影響評估，並確保廠址安全性。
- (6)國際合作：與 IAEA、美國 NRC 等國際機構合作，引入國際技術與標準。

NRA 的組織架構，領導層目前由一名主席（現任：山中伸介，2022 年起）與四名委員組成，任期 5 年，獨立於政府與業界。

下設原子力規制廳（NRA 事務局），負責日常監管工作，包括安全檢查與許可審查，實際業務執行及技術管理等事務，大多由原子力規制廳來進行。

依據 NRA 網站^[2]揭示，NRA 的組織架構如圖 2-2。



圖 2.2：日本 NRA 組織圖(圖片來源：日本 NRA 網站)

2.2.3 日本核電廠營運概況

日本核電廠的營運狀況，大致可分為營運中、建設中、規劃中以及預定除役等不同狀況，分別加以統計，依日本原子力產業協會統計^[3] (114年9月8日)，其統計狀況如下：

(1) 營運中核電廠：日本目前營運中核電廠計有 33 座，包括東海二號機、敦賀 2 號機等，並表列核電廠營運時間等基本資料，統計資料詳如表 2-2。

表 2-2：日本營運中核電廠統計表(摘自日本原子力產業協會網站)

2025 年 9 月 8 日現在 日本原子力產業協會

会社名	発電炉名	炉型	出力 MWe	運転開始	運転年数	原子炉設置(変更)許可手続き		設計及び工事計画の認可	営業運転再開	現在の発電状況
						審査申請	審査書案了/決定			
日本原電	東海第二**	BWR	1,100	1978.11.28	46	14.05.20	18.07.04/18.09.26	18.10.18		() 内は、本再稼働炉につき各々停止開始・期間・理由を表す。 2018.11.7 運転期間延長認可。特重施設を含めた安全対策工事は、2026.12 月完了予定。 2021.05.07 (14 年 4 月) (高圧燃料棒調査) 2021.04.22 (14 年 4 月) (定期検査) 2021.08.20 (14 年 9 月) (定期検査) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
	敦賀 2**	PWR	1,160	1987.02.17	38	15.11.05	24.08.28/24.11.13			2024.10.29 原子炉起動。11.4 設備点検に伴い停止。11.13 原子炉起動。11.15 発電開始。12.26 営業運転開始。2025.7.9 長期施設管理計画認可。2025.8.21 水素濃度検出器交換に伴う計画停止。8.30 原子炉起動。9.1 発電再開。
北海道電力	泊 1	PWR	579	1989.06.22	36	13.07.08				(2011.05.11) (14 年 5 月) (東北地震による停止) 2018.11.7 運転期間延長認可。特重施設を含めた安全対策工事は、2026.12 月完了予定。
	泊 2	PWR	579	1991.04.12	34	13.07.08				(2011.08.20) (14 年 9 月) (定期検査) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
	泊 3**	PWR	912	2009.12.22	15	13.07.08	25.04.30/25.07.30			2024.10.29 原子炉起動。11.4 設備点検に伴い停止。11.13 原子炉起動。11.15 発電開始。12.26 営業運転開始。2025.7.9 長期施設管理計画認可。2025.8.21 水素濃度検出器交換に伴う計画停止。8.30 原子炉起動。9.1 発電再開。
東北電力	女川 2	BWR	825	1995.07.28	30	13.12.27	19.11.27/20.02.26	21.12.23	24.12.26	(2011.05.11) (14 年 5 月) (東北地震による停止) 2018.11.7 運転期間延長認可。特重施設を含めた安全対策工事は、2026.12 月完了予定。
	女川 3***	BWR	825	2002.01.30	23					(2011.05.11) (14 年 5 月) (東北地震による停止) 2018.11.7 運転期間延長認可。特重施設を含めた安全対策工事は、2026.12 月完了予定。
東京電力	東通 1	BWR	1,100	2005.12.08	19	14.06.10				(2011.05.11) (14 年 5 月) (東北地震による停止) 2018.11.7 運転期間延長認可。特重施設を含めた安全対策工事は、2026.12 月完了予定。
	柏崎刈羽 1	BWR	1,100	1985.09.18	39					(2011.08.06) (14 年 7 月) (定期検査) 安全対策工事は完了時期は未定。
	柏崎刈羽 2	BWR	1,100	1990.09.28	34					(2007.07.05) (18 年 2 月) (トラブルに伴う停止) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
	柏崎刈羽 3	BWR	1,100	1993.08.11	32					(2007.07.16) (18 年 1 月) (新測地帯に伴う停止) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
	柏崎刈羽 4	BWR	1,100	1994.08.11	31					(2007.07.16) (18 年 1 月) (新測地帯に伴う停止) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
	柏崎刈羽 5	BWR	1,100	1990.04.10	35					(2012.01.25) (13 年 7 月) (定期検査) 2025.6.21 燃料棒検査完了。
	柏崎刈羽 6	ABWR	1,356	1996.11.07	28	13.09.27	17.10.04/17.12.27	24.09.02		(2011.08.23) (14 年 9 月) (定期検査) 2024.4.26 燃料棒検査完了。6.12 主要設備の健全性確認完了。2025.10.21 より燃料取り出し予定。2025.9.3~18 新測地帯による 6、7 号機の再稼働に関する住民説明会を実施。
中部電力	浜岡 3	BWR	1,100	1987.08.28	38	15.06.16				(2010.11.29) (14 年 9 月) (定期検査) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
	浜岡 4**	BWR	1,137	1993.09.03	32	14.02.14				(2011.05.13) (14 年 3 月) (経産大臣要請による停止) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
	浜岡 5	ABWR	1,380	2005.01.18	20					(2011.05.14) (14 年 3 月) (経産大臣要請による停止) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
北陸電力	志賀 1***	BWR	540	1993.07.30	32					(2011.03.01) (14 年 6 月) (再稼働ポンプ軸封部取替) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
	志賀 2	ABWR	1,206	2006.03.15	19	14.08.12				(2011.03.11) (14 年 5 月) (定期検査) 2022.05.05 (13 年 4 月) (定期検査) 2025.9.20~10.11 運主側の住民説明会を開催予定。
関西電力	美浜 3	PWR	826	1976.12.01	48	15.03.17	16.08.03/16.10.05	16.10.26	21.07.27	2016.11.16 運転期間延長認可。2022.7.28 特重施設管理計画認可。2025.3.27 長期施設管理計画認可(40 年以降)。2025.3.2 停止/定期検査開始。5.23 発電再開。6.18 営業運転開始。
	高浜 1	PWR	826	1974.11.14	50	15.03.17	16.02.24/16.04.20	16.06.10	23.08.28	2016.6.20 運転期間延長認可。2023.7.14 特重施設管理計画認可。2025.3.27 長期施設管理計画認可(50 年以降)。2025.9.6 停止/定期検査開始。12 月上旬発電再開。同月下旬営業運転開始予定。
	高浜 2	PWR	826	1975.11.14	49	15.03.17	16.02.24/16.04.20	16.06.10	23.10.16	2016.6.20 運転期間延長認可。2023.8.31 特重施設管理計画認可。2024.12.16 長期施設管理計画認可(40 年以降)。2024.11.6 停止/定期検査開始。2025.2.10 発電再開。3.7 営業運転開始。
	高浜 3*	PWR	870	1985.01.17	40	13.07.08	14.12.17/15.02.12	15.08.04	16.02.26	2023.5.29 運転期間延長認可。2020.12.11 特重施設管理計画認可。2025.1.17 長期施設管理計画認可(40 年以降)。2025.2.22 停止/定期検査開始。6.4 発電再開。6.30 営業運転開始。
	高浜 4*	PWR	870	1985.06.05	40	13.07.08	14.12.17/15.02.12	15.10.09	17.06.16	2023.5.29 運転期間延長認可。2021.3.25 特重施設管理計画認可。2025.1.17 長期施設管理計画認可(40 年以降)。2025.6.18 停止/定期検査開始。9 月下旬発電再開。10 月下旬営業運転開始予定。
	大飯 3	PWR	1,180	1991.12.18	33	13.07.08	17.02.22/17.05.24	17.08.25	18.04.10	2022.12.8 特重施設管理計画認可。2024.6.26 長期施設管理計画認可。2025.6.1 停止/定期検査開始。2025.8.16 発電再開。2025.9.10 営業運転開始予定。
中国電力	島根 2***	BWR	820	1980.02.10	36	13.12.25	21.06.23/21.09.15	23.08.30	25.01.10	2022.8.10 特重施設管理計画認可。2024.6.26 長期施設管理計画認可。12.14 停止/定期検査開始。2025.2.22 発電再開。3.19 営業運転開始。
	伊方 3*	PWR	890	1994.12.15	30	13.07.08	15.05.20/15.07.15	16.03.23	16.09.07	2025.5.21 長期施設管理計画認可。2024.12.7 原子炉起動。12.23 発電再開。2025.1.10 営業運転開始。
九州電力	玄海 3*	PWR	1,180	1994.03.18	31	13.07.12	16.11.09/17.01.18	17.08.25	18.05.16	2022.12.5 特重施設管理計画認可。2025.3.5 長期施設管理計画認可。2025.3.28 停止/定期検査開始。6.15 発電再開。7.10 営業運転開始。
	玄海 4	PWR	1,180	1997.07.25	28	13.07.12	16.11.09/17.01.18	17.09.14	18.07.19	2023.2.2 特重施設管理計画認可。2025.7.27 停止/定期検査開始。10.28 営業運転開始予定。
	川内 1	PWR	890	1984.07.04	41	13.07.08	14.07.16/14.09.10	15.03.18	15.09.10	2023.11.1 運転期間延長認可。2020.11.11 特重施設管理計画認可。2024.11.29 長期施設管理計画認可(40 年以降)。6.14 停止/定期検査開始。8.29 発電再開。9.25 営業運転開始。
	川内 2	PWR	890	1985.11.28	39	13.07.08	14.07.16/14.09.10	15.05.22	15.11.17	2023.11.1 運転期間延長認可。2020.12.16 特重施設管理計画認可。9.14 停止/定期検査開始。11.30 発電再開。12.25 営業運転開始。2025.9.5 長期施設管理計画認可(40 年以降)。
	小計	33 基 (17 基は PWR、16 基は BWR、1 基は ABWR、1 基は PWR/ABWR 複合炉) **：再稼働中 ***：再稼働予定	33,083	運転年数別基数 (50 年超: 1 基、40~49 年: 6 基、30~39 年: 18 基、30 年未満: 8 基)	25 基 (24,838MWe)	18 基/18 基 (17,977MWe)/ (17,977MWe)	17 基 (17,065MWe)	14 基 (13,253MWe)		本再稼働炉の停止期間：平均 14 年 9 月 ・停止期間については、新規制基準施行後、発電を開始した時点で終了とみなす。

(2)建設中核電廠：日本建設中核電廠計有 3 座，包括大間核電廠、東通 1 號機及島根 3 號機等，統計如表 2-3。

表 2-3：日本建設中核電廠統計表(摘自日本原子力産業協會網站)

建設中

会社名	発電炉名	炉型	出力 MWe	着工 (工認)	運転 開始	新基準への 審査申請
電源開発	大間 *	ABWR	1,383	2008.5	未定	2014.12.16
東京電力	東通 1	ABWR	1,385	2011.01	未定	
中国電力	島根 3	ABWR	1,373	2005.12	未定	2018.8.10
小計	3 基		4,141			

*印：旧基準での MOX 許可取得。

(3)計畫中核電廠：日本計畫中核電廠計有 8 座，包括敦賀 3、4 號機、東通 2 號機、濱岡 6 號機等，統計如表 2-4。

表 2-4：日本計畫中核電廠統計表(摘自日本原子力産業協會網站)

計畫中

会社名	発電炉名	炉型	出力 MWe	着工 (工認)	運転 開始
日本原電	敦賀 3	APWR	1,538	未定	未定
	敦賀 4	APWR	1,538	未定	未定
東北電力	東通 2	ABWR	1,385	未定	未定
東京電力	東通 2	ABWR	1,385	未定	未定
中部電力	浜岡 6	ABWR	1,400 級	未定	未定
中国電力	上関 1	ABWR	1,373	未定	未定
	上関 2	ABWR	1,373	未定	未定
九州電力	川内 3	APWR	1,590	未定	未定
小計	8 基				

(4)除役核電廠：日本列於除役的核電廠機組計有 27 座，包括 JPDR、東海核電廠、濱岡 1、2 號機等，其中 JPDR 已完成除役，而福島第一核電廠的四座機組目前正進行福島事故後處理作業，雖表示會

除役但尚未有明確除役計畫，其餘 22 座機組則處於除役規劃或在除役進行中，統計如表 2-5。

表 2-5：日本除役核電廠統計表(摘自日本原子力産業協會網站)

廃止 発電実績のある試験研究炉も含む

発電炉名	炉型	出力 MWe	廃止日(試験 研究炉につ いては運転 終了日)	備考
JPDR	BWR	12	1976.03.18	1996.04.31 解体撤去完了
ふげん	ATR	165	2003.03.29	2008.02.12 廃止措置開始 2040 年度完了予定
東海	GCR	166	1998.03.31	2001 年廃止措置開始 2030 年度完了予定
浜岡 1	BWR	540	2009.01.30	2009.11.18 廃止措置開始 2042 年度完了予定
浜岡 2	BWR	840	2009.01.30	2009.11.18 廃止措置開始 2042 年度完了予定
福島第一-1	BWR	460	2012.04.19	冷温停止(2011 年 12 月) から 30~40 年後、 廃止措置完了予定
福島第一-2	BWR	784	2012.04.19	
福島第一-3	BWR	784	2012.04.19	
福島第一-4	BWR	784	2012.04.19	
福島第一-5	BWR	784	2014.01.31	(1~4 号機廃炉の実機実証試験に活用)
福島第一-6	BWR	1,100	2014.01.31	(1~4 号機廃炉の実機実証試験に活用)
敦賀 1	BWR	357	2015.04.27	2047 年度廃止措置完了予定
美浜 1	PWR	340	2015.04.27	2045 年度廃止措置完了予定
美浜 2	PWR	500	2015.04.27	2045 年度廃止措置完了予定
玄海 1	PWR	559	2015.04.27	2054 年度廃止措置完了予定
島根 1	BWR	460	2015.04.30	2049 年度廃止措置完了予定
伊方 1	PWR	566	2016.05.10	2056 年度廃止措置完了予定
もんじゅ	FBR	280	2017.12.06*	2047 年度廃止措置完了予定
大飯 1	PWR	1,175	2018.03.01	2048 年度廃止措置完了予定
大飯 2	PWR	1,175	2018.03.01	2048 年度廃止措置完了予定
伊方 2	PWR	566	2018.05.23	2059 年度廃止措置完了予定
女川 1	BWR	524	2018.12.21	2053 年度廃止措置完了予定
玄海 2	PWR	559	2019.04.09	2054 年度廃止措置完了予定
福島第二-1	BWR	1,100	2019.09.30	2064 年度廃止措置完了予定
福島第二-2	BWR	1,100	2019.09.30	2064 年度廃止措置完了予定
福島第二-3	BWR	1,100	2019.09.30	2064 年度廃止措置完了予定
福島第二-4	BWR	1,100	2019.09.30	2064 年度廃止措置完了予定
27 基		17,880	*廃止措置計画認可申請日	

除役核電廠為本計畫關注重點，在先前的系列研究中，已研究過 JPDR、濱岡 1、2 號機等的拆除實務概況，並研究島根 1 號機長期停機的相關措施，而本年度計畫則以東海核電廠進行的除役實際案例以及說明在 2022 年後濱岡核電廠 1、2 號機等的拆除後續進行概況，必要時並參酌其

他電廠的除役作業，作為研究探討對象，包括核能電廠除役管制文件、法規與工程管理作法及實務案例，例如人員管制、作業安全及拆除廢棄物管理等。

2.3 除役管制文件與工程管理

2.3.1 除役管制文件

依據 NRA 制定「核原物料、核燃料及原子爐管制法」^[4]第 43 條之 3 之 34 第 2 項：

發電用原子爐設置者擬進行除役作業時，應先依原子力規制委員會之規定，制定該除役作業相關計畫（下條稱「除役計畫」），並取得原子力規制委員會之認可。

另依據「商用原子爐之設置、運轉等相關規則」^[5]第 116 條：

欲除役計畫取得核准者，應針對擬除役之每座發電用原子爐，訂定下列各款事項之除役措施計畫，並檢附計畫之申請書提交原子力規制委員會審查：

- (1) 姓名或名稱及地址；法人則須載明其代表人姓名
- (2) 工廠或事業場所名稱及所在地
- (3) 發電用原子爐名稱
- (4) 除役作業設施及其用地
- (5) 前項設施中屬於拆除作業之設施及其拆除方法
- (6) 作業期間需維持性能之設施
- (7) 維持性能之設施的位置、結構、設備及其性能，以及應維持該性能之期間
- (8) 核燃料物質之管理及移轉

- (9)核燃料物質所導致污染之清除
- (10)核燃料物質或受核燃料物質污染物之廢棄物
- (11)處理廢棄物相關作業之工程
- (12)處理廢棄物作業之相關品質管理系統

由以上法令規定可知，除役計畫書為最主要管制文件，規劃整個除役作業架構，其次則是隨著除役作業的進行，視情況可能需要提送 NRA 審查核准者概略有安全規範變更申請、燃料移除計畫、除污作業計畫、反應器拆除計畫、基地內埋設處置計畫、廠址復原計畫、緊急應變計畫、輻射防護計畫與環境影響評估報告等。

2.3.2 工程管理

除役現場作業，就本質上而言屬於拆除工程，而與一般拆除工程的最大差異點，乃在於必須考量輻射相關問題，從而衍生許多更加嚴格的規範，以工程管理而言，主要考量的要點如下：

- (1)進度管理：依各階段規劃，包括燃料搬出與燃料池管理、非反應器區域拆除、反應器區域拆除、廠房建物等拆除、廠址復原等，劃分各階段工作要項及完成時間，設定工作分解結構 (WBS)，進行各分階段里程碑與進度管控。
- (2)輻射防護管理：進行區域劃分，將清潔區、輻射管制區、作業區明確界定，對於人員輻射劑量加以管制，包括進出管制、劑量監測、污染檢測等。此外對於廢棄物依計畫執行，尤其是放射性廢棄物，應依規劃加以分類、除污、進行臨時貯存與最終處置。
- (3)作業安全管理：選擇適當拆除工法，如遠端控制切割、水刀切割、鑽孔爆破等，依輻射風險評估決定合適工法，並進行作業風險評估

與分析模擬，確保不會發生意外事故與輻射擴散。對於工安設施，包括防墜落、防火、防爆等設施需依規定設置，並要求確實穿戴個人護具。

(4)環境影響管理：包括排水管制、放射性廢水處理與監測（避免流入非管制區域）、粉塵與空氣中放射性核種過濾（HEPA 濾網設備）並監測、依法規管理施工噪音與震動。

(5)文件紀錄管理：對於施工紀錄應妥善保存，包括每一階段拆除進度、廢棄物重量、放射性核種濃度、施工日期、品質檢查紀錄等。

整個工程管理作業龐大而複雜，後續將擇其要點加以說明，包括除役階段劃分、作業安全管理、人員進出管制等，並說明廢棄物管理相關概況。

2.3.3除役階段劃分

進度管理為除役作業工程管理的第一個項目，進度控制的首要條件，需要對作業執行進度有明確而合理的規劃。

日本原子力規制委員會（NRA）對核電廠除役階段劃分並無強制的法令規定，而是提供指導原則，讓核電廠營運方根據設施狀況制定除役計畫。NRA 審查的主要依據為「核原物料、核燃料及原子爐管制法」第 43 之 3 條與其相關子項，規定除役計畫需涵蓋安全管理、廢棄物處理與環境影響評估等方面。

NRA 的審查重點在於計畫的可行性並須合乎法令規定，且訂有商用及試驗研究用反應器設施等核設施除役計畫審查標準^[6]，明確揭示關於除役計畫的審查要點，作為核電廠營運方制定除役計畫的參考。實際進行除役階段規劃，通常參考國際原子能總署（IAEA）的標準（如 GSR Part 6

或 SSG-47)，核電廠營運方在提交除役計畫書時，自行依核電廠現況制定各階段工作與所需時程。

在 IAEA SSG-47「核電廠、研究用反應器及其他核燃料循環設施的除役」^[7]中，IAEA 並沒有明確建議「四個」除役階段，但著重說明將除役過程劃分為幾個階段的必要性。IAEA 強調，除役應依據設施狀況與策略來劃分階段，但在任何策略下，都應包含三個主要階段（three principal phases），並可細分為多個子階段，這三個主要階段包括：

(1)階段 1：準備階段（Preparatory Phase）：停機後至開始實際進行拆除前。主要任務為規劃、特性調查、初步除污與確保支援除役之設施穩定。可能的工作包括：規劃除役計畫、用過核燃料移除、廠址輻射調查、初步除污、申請監管單位許可等。

(2)階段 2：執行階段（Implementation Phase）：主要任務為執行廠房及設備的除污工作，與設備、系統的拆除作業。可能的工作包括：依調查結果執行建物設備除污工作、進行設備及系統的拆除作業、廢棄物分類、貯存與運送、輻射監測與環境監控、更新安全與進度等報告。

(3)階段 3：最後偵測與廠址復原（Final Survey & Site Release Phase）：主要任務為拆除完畢後，進行最後輻射偵檢與復原廠址至可外釋再利用。可能的工作包括：最終狀態環境偵檢，確認輻射狀況符合法規解除標準、文件整理與保存、向主管機關申請解除管制等。

一般日本核電廠除役作業階段規劃，若除役計畫書的申請與核准不計入作業階段，較常見者分為四階段，在此列舉美浜核電廠^[8]規劃加以說明，該廠除役計畫作業分為四個階段，整個除役過程時間規劃約 30 年，包括：

- (1)第一階段(拆除準備)：在完成核電廠除役計畫的申請及審查後，進入第一個階段，稱之為拆除準備階段。在拆除準備階段，主要進行廠房設備系統性的除污和殘留放射性物質調查，並同時制定第二階段及以後的施工計畫。此外，將移除核燃料，並開始拆除汽機廠房內未受放射性物質污染的二次系統設備。
- (2)第二階段(反應器周圍的設備移除)：本階段將開始拆卸並移除反應器周邊的低輻射設備等相關設備，並將在本階段結束前移除用過核燃料（用過燃料）。
- (3)第三階段(反應器區域拆除)：本階段主要在拆除反應器本體及其相關設備。待輻射強度下降後，反應器所在區域將開始進行拆除。
- (4)第四階段(廠房建物拆除)：第四階段主要在拆除廠房建物，復原土地原貌。在此階段管制區將被解除，反應器廠房和其他建物都將被拆除，使廠址恢復原貌。

2.3.4除役階段實際案例

從表 2-5 可知，除役進度較超前的日本核電廠包括 JPDR、普賢(ふげん)、東海、濱岡、敦賀及美浜等核電廠，其中以 JPDR 最快，已完成除役的整個流程，但 JPDR 經各方多年研究，目前並無新的資料可供研析，其次則為東海核電廠、濱岡核電廠，而濱岡核電廠的第一、二階段已於 110 年進行相關研析，所以本節將列舉東海核電廠的實際分階段除役案例，說明分階段作業實務狀況，以及與我國核一廠反應器同型的濱岡核電廠除役近期狀況。

(1)東海核電廠的實際分階段除役案例

·廠房建物等拆除：2034 年度~2035 年

由以上期程規劃可知，並非完成一個階段後再進行下一個階段，有些部分可能同時進行，將視工程狀況安排適合的作業工項。

(A) 第一階段(拆除反應器以外的區域)

在完成核電廠除役計畫書的申請並經 NRA 審查核准之後，開始進入第一個階段，主要工作為相關準備作業，以及拆除反應器以外的區域階段，主要拆除作業示意圖如圖 2-4 所示。



圖 2.4：東海核電廠除役第一階段示意圖(摘自 JAPC 網站)

實際拆除作業，包括用過燃料池清理排水工程、汽機廠房設備拆除工作等，如圖 2-5、2-6。

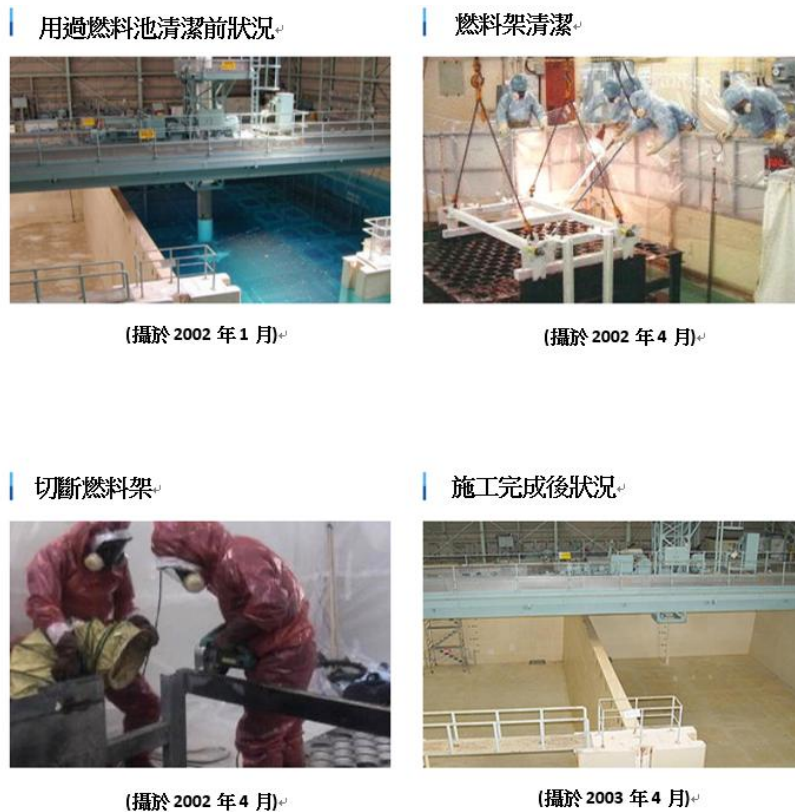


圖 2.5：東海核電廠用過核燃料冷卻池清理排水(摘自 JAPC 網站)



圖 2.6：東海核電廠渦輪機建築區設備拆除(摘自 JAPC 網站)

(B) 第二階段(主要為熱交換器拆除)

第二階段拆除作業主要重點在拆除熱交換器，拆除作業工作示意圖如圖 2-7。

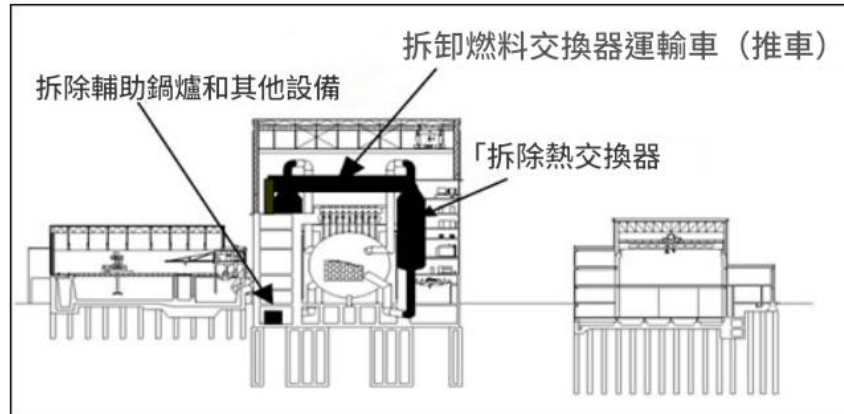
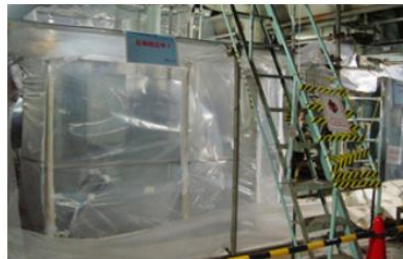


圖 2.7：東海核電廠第二階段示意圖(摘自 JAPC 網站)

實際拆除作業，熱交換器等的拆除工作如圖 2-8。

氣體循環器區域分區工作



(攝於2006年10月)

拆除屋頂設備 (安全閥、噴嘴、屋頂風扇等)



(攝於2006年12月)

拆除熱交換器屋頂熱氣管道 (熱交換器進氣管道) 之前



(攝於2007年6月)

拆除熱交換器頂部的熱氣管道後



(攝於2008年10月)

圖 2.8：東海核電廠熱交換器等的拆除工作(摘自 JAPC 網站)

(C) 第三階段(反應器區域拆除)

第三階段拆除作業主要重點在反應器區域，拆除作業工作示意圖如圖 2-9。

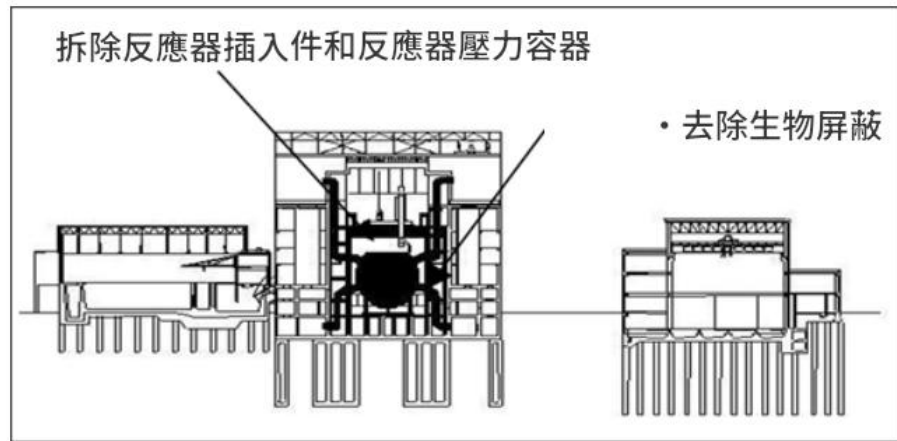


圖 2.9：東海核電廠第三階段示意圖(摘自 JAPC 網站)

第三階段拆除反應器爐體，是整個拆除作業放射性強度最高的區域，所以需事先詳加規劃，施工步驟如圖 2-10。

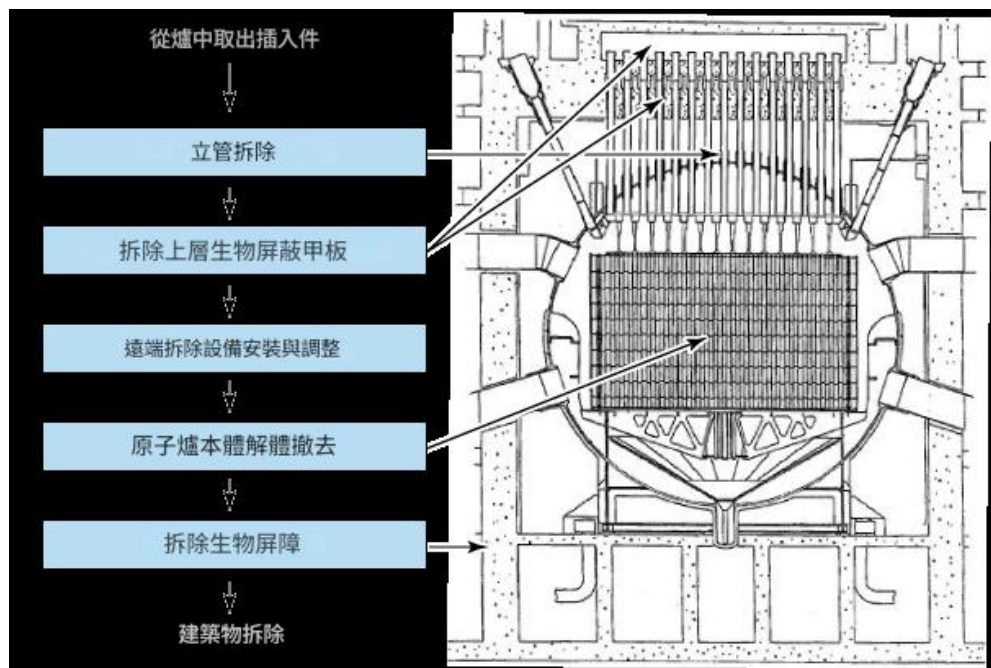


圖 2.10：東海核電廠反應器爐體拆除順序示意圖(摘自 JAPC 網站)

(D) 第四階段(建物拆除)

第四階段拆除作業主要重點在廠房建物物拆除及廠址復原，拆除作業工作示意圖如圖 2-11。

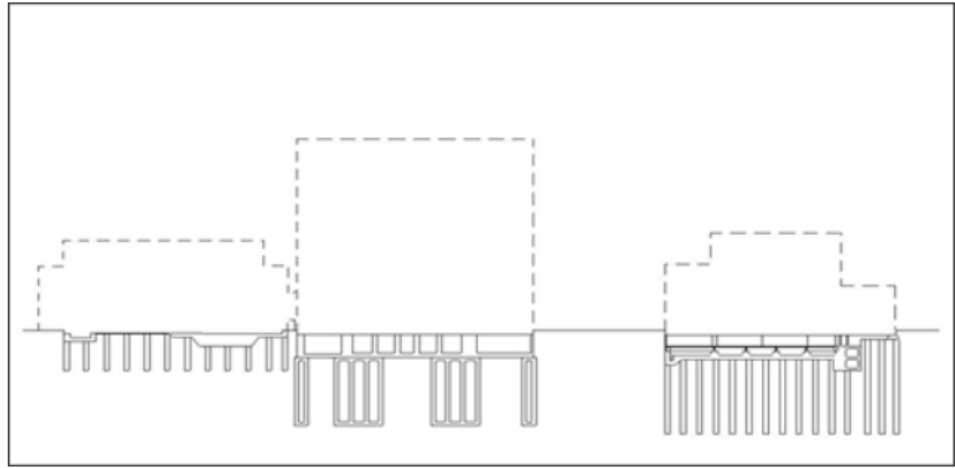


圖 2.11：東海核電廠第四階段示意圖(摘自 JAPC 網站)

(E) 除役計畫修訂

東海核電廠除役計畫於 2006 年 6 月 30 日獲得核准，並開始除役工作；但基於以下原因，東海核電廠於 2020 年 9 月 18 日提交了除役計畫修訂申請^[10]。

- (a) 為配合對核反應器規章檢查制度審查的新規定，經修訂後，除役計畫中增加了性能維護設備和品質管理系統的相關事項。因此，相關資訊將進行修改和補充。
- (b) 為了提高除役工作期間的作業安全，反應器廠房排氣煙囪將會縮短。因此，將重新評估核電廠周圍民眾在正常和意外條件下的輻射劑量評估，並修改相關描述。
- (c) 隨著除役工作的推進，部分設備的功能已變得不再必要，因此將重新評估性能維護設備，並修改相關描述。

經修訂後除役作業工程時程規劃變更如圖 2-12。

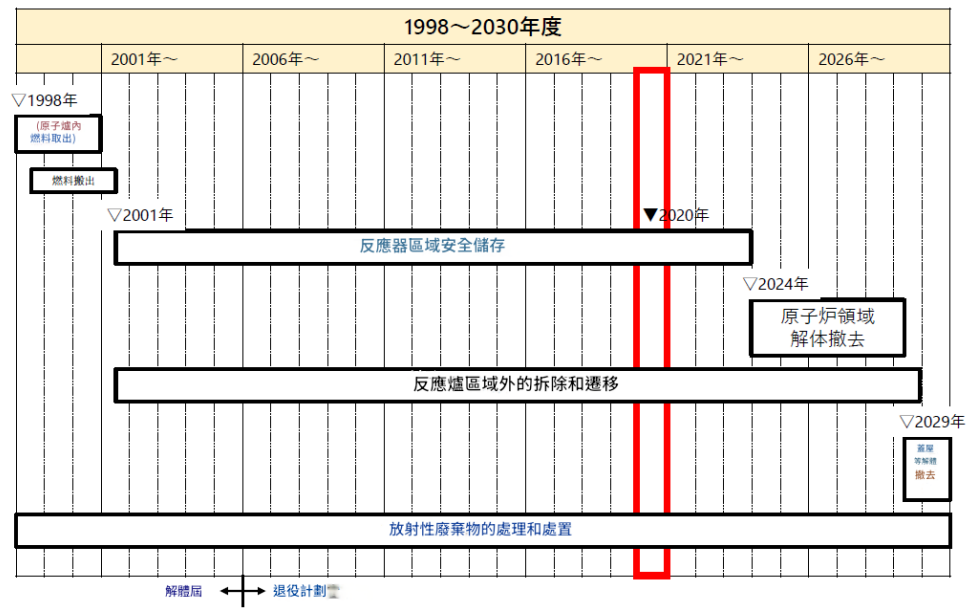


圖 2.12：東海核電廠除役時程變更示意圖(摘自 NRA 網站)

(2) 濱岡核電廠除役作業近況

110 年委託研究計畫曾對日本濱岡核電廠所執行的除役計畫作業進行研析，揭露該核電廠在執行上的實務經驗，主要在第一、二階段的除役工作。由於該反應器類型與我國核一廠相同，所以對於後續除役作業的進展仍然加以關注，可作為後續除役作業參考。

原先的規劃，濱岡核電廠的除役工作應該在 2023 年開始進入第三階段，但因為以下的數次除役計畫變更，以至於 2024 年 12 月才宣布進入第三階段。包括：

(A) 2023 年 3 月除役計畫變更

中部電力公司在其網站中指出，濱岡核電廠基於以下原因，在 2023 年 3 月提出除役作業計畫變更申請，變更主要項目如下：

(a) 第三階段開始時程延期

針對日本國內首座商業用輕水反應器之第三階段反應器區域拆除作業，廠方持續審慎研擬安全且高效之拆除方法，以及盡可能降低拆除過程中產生之放射性廢棄物之對策。

基於迄今污染狀況的調查資料，為進一步研擬降低拆除作業輻射劑量的安全對策，以及提升拆除廢棄物處理與貯存效率，將第三階段啟動時程由 2023 年度延至 2024 年度。

(b)追加反應器區域周邊設備之拆除對象

針對反應器區域周邊設備之拆除作業，依循「先擬定拆除計畫之設備，再適時追加拆除對象設備清單，並提出除役計畫變更核准申請」之原則執行。

本次新增擬定拆除計畫之抑壓池、圍阻體設備搬運入口及其屏蔽，納入拆除對象設備清單。

(c)其他事項

針對新增拆除設備，同步更新輻射曝露評估條件、修正描述方式並完善記載內容。

(B)2024 年 3 月除役作業計畫變更

濱岡核電廠依據 2016 年獲准變更之除役計畫，持續執行除役第二階段工程。同時針對第三階段反應器區域解體與拆除，已審慎研擬安全高效之解體方法，以及盡可能降低解體過程中產生之放射性廢棄物之對策。此次因第三階段計畫已臻完備，故提出除役計畫變更核准申請。本次申請內容如下：

(a)具體化第三階段拆除工程

針對爐內結構物、反應器壓力槽、反應器圍阻體等設備，具體化拆除工法，並反映拆除作業所伴隨之輻射曝露評估結果。

拆除工程所產生之拆除廢棄物，將與過往相同原則，盡可能進行再利用；至於將成為放射性廢棄物之部分，則於最終處置地點確定前，於廠房內安置保管。

(b)除役時程變更

因應解體工程具體化而重新審視工程時程，將原定 1、2 號機同步解體的計畫調整為 2 號機優先於 1 號機先行解體，據此將第三階段工程期從現行 6 年延長至 12 年。

(c)其他事項

i.海水取水路線變更

因應除役進度，將改由 3 號機取水槽取水。因 1、2 號機取水管路及取水塔不再需要，將依據「海岸法」進行原形復原，並依「國有財產法」恢復原狀，實施取水管路回填及取水塔拆除等作業。

ii.記載內容之規範化

已完成資料修訂及記載內容規範化等作業。將持續以確保安全為首要原則，在保證資訊透明的前提下，穩定推進 1、2 號機的除役措施。

(C)2024 年 12 月除役計畫變更核准

2024 年 3 月針對濱岡核能電廠除役作業計畫變更申請，經過三次修正（2024 年 7 月、11 月、12 月部分修正）及 2024 年 6 月所提交之反應器設備保安規定變更申請（2024 年 12 月 3 日部分修正），已於 12 月 18 日獲原子力規制委員會(NRA)核准。

基於上述核准文件，經完成內部行政程序後，濱岡核電廠 1、2 號機將於 2024 年 12 月 25 日起正式開始除役第三階段。主要核准內容如下：

(a) 具體化第三階段拆除工程

- i. 明確化爐內結構物、反應器壓力槽、反應器圍阻體等拆除工法。
- ii. 反映拆除作業伴隨之輻射曝露評估結果

(b) 除役工程時程變更

將第三階段工程期由 6 年延長至 12 年

(c) 其他事項

- i. 海水取水管路變更
- ii. 記載內容之規範化

此外，對於區域安全相關規定，主要核准內容如下：

- (a) 增設拆除廢棄物等貯存區域及追加其管理措施。
- (b) 放射性氣體廢棄物排放管理設定值變更。
- (c) 記載事項之適當化。

未來除役作業，將持續以確保安全為首要原則，在保證資訊透明的前提下，穩定推進 1、2 號機的除役措施。濱岡核電廠經變更後的除役期程^[11]如圖 2-13。

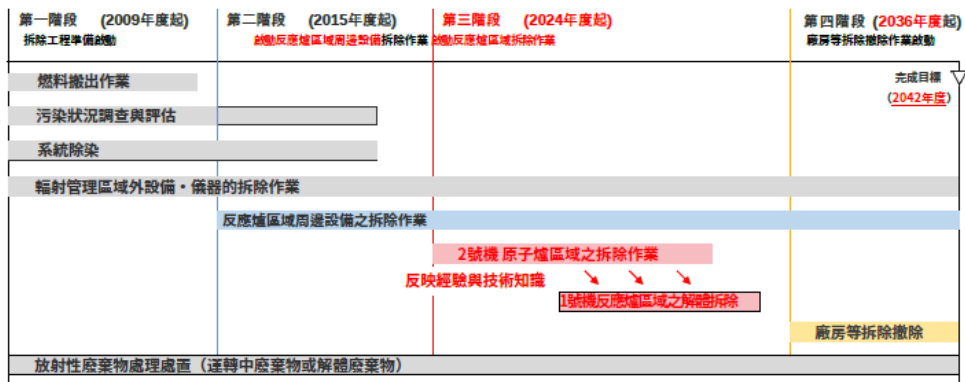


圖 2.13：濱岡核電廠除役時程變更示意圖(摘自中部電力公司網站)

2.3.5 作業安全管理

核電廠在除役作業過程中的安全管理，為所有管理中的重中之重，對於安全管理的了解與重視，方能使除役作業按計畫順利執行。而作業安全管理主要著重在以下方面：

- (1) 進出管制：依輻射強度的不同，設置不同區域，例如紅區採雙重門禁、黃區單重門禁，綠區則登記開放等，設置適合實際情況的管理方式。此外應設置監控系統，全時記錄進出狀況與劑量量測數據，並管控進出人員資格，僅獲得許可人員可進入，預防誤入風險，在不同管制區域，對於人員與物品進出依規定進行查核，確保無非經允許的人員或物品進出。
- (2) 輻射安全管理：確實依規定對於人員、物品與環境進行輻射劑量量測，嚴格控制作業人員曝露劑量；作業時應穿著適當防護裝備，例如使用全套防護服、配備呼吸器與 HEPA 過濾等。拆除之設備與作業人員經高壓水洗或化學除污等方式除污，並經過相關儀器檢測，確保殘留輻射合於規定。

- (3)設備操作：須由具資格人員，對於經檢證合格設備依規定進行操作。盡量使用能減少輻射曝露的操作方式，如使用遠程機械臂與雷射切割等，以降低輻射曝露。對於操作過程中粉塵與廢棄物須加以控制，例如安裝負壓通風與 HEPA 過濾等。並須定期進行設備維護，例如定期校正機械與探測器，每季檢查設備狀況，確保精度與安全性。
- (4)廢棄物管理：廢棄物需加以分類，並分別加以不同方式處置，產生的放射性廢棄物，若為低放射性廢棄物，可能進行土地內埋設，高放射性廢棄物，可能運往最終處置場等。並視狀況進行環境監測，例如全時監測廠址土壤、地下水等狀況，每小時記錄，並每月更新數據。
- (5)緊急應變：為應付意外事件，需制定緊急應變計畫，例如模擬輻射外洩、地震或粉塵事件，制定疏散路線與時間標準。對於可能發生的意外，應設置適當緊急應變裝備，例如設置輻射屏蔽室與醫護站，作業員劑量超標立即檢查等。所有模擬的緊急狀況，規劃應變方案，應使相關人員均能了解與熟悉。
- (6)異常事件：對於異常事件的發生需加以記錄，確實釐清產生原因及影響，並據以檢討改善作業程序與相關規定，並需傳達至所有相關人員且要求遵守。

對於以上各項，本文將對人員進出管制及廢棄物處理進行相關描述。

2.3.6人員進出管制

日本核電廠除役作業的人員進出管制，被視為安全管理作業的主要重點之一，其概略要項包括：

(1) 依據輻射風險分區

- (A) 依輻射強度的不同，設置不同區域劃分，並施以不同管制方式，例如管制區劃分為紅區、黃區，並分別設置雙重門禁與單重門禁，而非輻射區域則設為綠區，設置為開放等。
- (B) 管制區域分為物質污染程度和空氣中輻射強度不太可能超過法律規定管制區域值的區域（無污染風險管制區域），以及物質污染程度和空氣中輻射強度超過或可能超過法律規定管制區域值的區域（有污染風險管制區域），設置符合實際情況之管理方式。

(2) 進出許可管制

- (A) 對於具備資格進入管制區之工作人員，應提前審核並給予輻射工作人員或其他檢查人員准予進入管制區域的許可證件。
- (B) 在管制區域的出口設置相關設備進行監測，透過在管制區域出入口安裝門禁設備，對人員進出進行持續監控，全時記錄進出狀況與劑量量測數據，並管控進出人員資格，僅限通過認證人員可進入，預防誤入風險。
- (C) 在不同管制區域，對於人員與物品進出依規定進行查核，並確保無非經允許的人員或物品進出。

(3) 護具與檢測

- (A) 進入管制區域的人員將被要求佩戴個人劑量計，必要時須按規定穿著防護服並配戴個人護具。
- (B) 離開有污染風險的管制區域時，應使用污染偵檢器等對自己的身體和穿戴物品進行污染檢測。如果發現污染，則需採取除污等措施，直至符合規定後方可離去。

(4) 防止非法侵入

- (A) 設置限制出入的區域，除指定的出入口外，他處一律不得進出。
- (B) 限制方式為採用足夠高度的金屬圍籬並配備防止非法侵入的設備，額外對建物設置堅固的屏障，例如鋼筋混凝土結構和鐵門等，以防止非經許可的侵入。
- (C) 另外對於電信方面的防止入侵，透過從物理上阻止電信電路等從外部未經授權地存取資訊系統，並防止透過電信電路進行破壞，與保護處理設備所需的設備和維持設備運作等相關的資訊系統設計。

2.4 廢棄物分類與處理

2.4.1 廢棄物分類

以是否具有放射性做為廢棄物分類的考量標準，日本將廢棄物分為一般家庭、工廠等產生的非放射性廢棄物，以及核電設備產生的放射性廢棄物。

依日本原子力文化財團網站^[12]，日本廢棄物分類表如表 2-6：

表 2-6：日本廢棄物分類表(摘自核能與能源圖面集網站)

廢棄物分類

非放射性廢棄物	一般廢棄物	垃圾	生活垃圾：一般垃圾（可燃垃圾、不可燃垃圾等）、大件垃圾 商業垃圾：來自辦公室、餐廳等的垃圾。
		人體排泄物	
		特殊管理的一般廢棄物*1	
	工業廢棄物	法律規定的20種商業活動所產生的廢棄物*2	
		特殊控制的工業廢棄物*3	
放射性廢棄物	低放射性廢棄物	發電廠廢棄物	放射性極低的廢棄物
			放射性水平相對較低的廢棄物
			放射性水平相對較高的廢棄物
	鈾廢料		
	含有超鈾核素的放射性廢物（TRU廢物）		
高放射性廢棄物			

*1 爆炸性、有毒、傳染性或其他可能對人類健康或生活環境造成損害的物質。

*2 爐渣、污泥、廢油、金屬碎屑、玻璃碎屑、混凝土碎屑等。

*3 除一般廢棄物外，具有爆炸性、毒性、傳染性或可能對人類健康或生活環境造成損害的物品。

日本廢棄物產生量，以西元 2017 年前後實際產生的廢棄物數量，統計概估如下表，表 2-7。

表 2-7：日本棄物數量概估表(摘自核能與能源圖面集網站)

日本產生廢棄物數量

	每日產生的廢棄物量 (噸/天)	備註	
一般廢棄物	主要包括家庭食物垃圾和體積較大的垃圾，以及辦公室等場所的紙張垃圾。 117,057	2017年實績	
工業廢棄物	商業活動產生的廢棄物，例如廢塑膠、廢酸、廢鹼等。 1,060,274	2016年實績	
放射性廢棄物	核設施運作維護過程中產生的放射性廢棄物	高放射性 1.4	2000年至2006年估算
		低放射性 44	2017年實績

2.4.2 放射性廢棄物種類與可能處理方式

放射性廢棄物又根據其放射性強度和性質進行進一步的分類。放射性廢棄物大致可概分為高放射性和低放射性兩大類，而低放射性廢棄物再以放射性強度劃分為三個等級。各種放射性廢棄物均依其放射性強度而進行不同方式的處理。放射性廢棄物的大致種類劃分及可能的處理方式如表 2-8。

表 2-8：日本放射性廢棄物種類(摘自核能與能源圖面集網站)

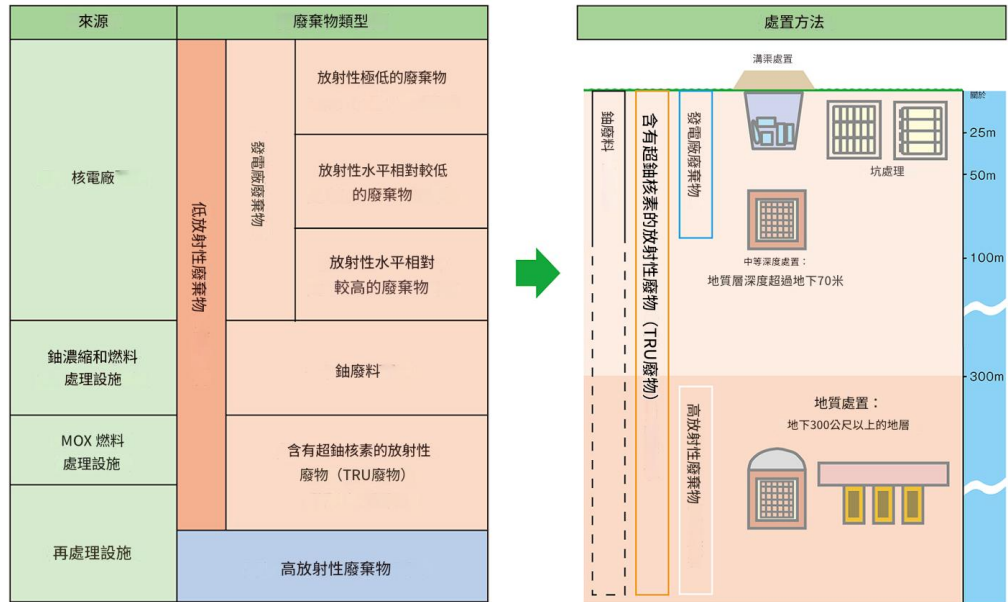
廢棄物種類		廢棄物範例	產生場所	處置方法(例)	
低放射性廢棄物	發電廠廢棄物	放射性水平極低的廢棄物	核能發電廠	溝渠處置	
		放射性水平較低的廢棄物		坑道處置	
		放射性水平較高的廢棄物		中深度處置	
	鈾廢料		消耗品、廢棄物、廢棄器材	鈾濃縮燃料加工設施	中深度處置、坑道處置、溝渠處置、必要時採用地層處置
	含超鈾核種之放射性廢棄物(丁類廢棄物)		燃料棒的零件、廢液、濾器	再處理設施、鈾燃料加工設施	地層處置、中深度處置、坑道處置
高放射性廢棄物		玻璃固化體	再處理設施	地層處置	
低於豁免管制值的廢棄物		大部分核電廠拆解廢棄物	上述所有發生地點	再利用/作為一般物品進行處置	

對於放射性廢棄物的處理，主要是針對核電廠以及核燃料相關產業所產生的廢棄物。對於低放射性廢棄物，基本上會以掩埋方式處置，高放射性廢棄物則規劃於再處理設備進行玻璃固化後，在陰涼處貯存 30 至 50 年，之後再運往地下至少 300 公尺深處處置。

關於各種放射性強度分類以及處理概要示意圖如圖 2-14。

放射性廢棄物類型及處置概述

根據放射性水平選擇深度和屏障，處置方式有三種：溝槽/坑處置、中等深度處置和地質處置。



8-1-5

核電/能源圖集

資料來源：根據美國自然資源與能源署網站整理

圖 2.14：放射性廢棄物種類及處理方式(摘自核能與能源圖面集網站)

2.4.3 解除管制制度(クリアランス制度)

對於輻射強度非常低的廢棄物而言，由於對人體與環境所造成的影響非常微小，若以掩埋或其他處理方式當成放射性廢棄物處理，成本甚高而收效極微，似乎並非必要，乃至於有另一種處理方式，謂之解除管制制度(クリアランス制度)。

這一種制度，對於輻射強度足夠低，不需要作為放射性廢棄物處理的物質，在獲得政府批准和確認後，重新利用或作為工業廢棄物處理。

解除管制制度允許政府（核子監管機構）審查核設施產生廢棄物的放射性濃度是否低於「清潔水平」，即對健康造成的風險可忽略不計。該制度允許將這些物質作為一般廢棄物或再生資源進行再利用和處置，而

不是作為放射性廢棄物來處置。其目的是促進資源的有效利用和建立循環型的社會，同時也方便除役工程產生的廢棄物的處理和處置。

以上所說的「清潔水平」，是指人體每年額外接受的輻射劑量僅為0.01毫西弗（mSv）的輻射劑量。此輻射劑量低於天然輻射劑量的百分之一，並且基於國際原子能機構（IAEA）的標準，該標準規定對人體健康的影響可以忽略不計。經確認「無需作為放射性廢棄物處理」的物質，可作為工業廢棄物或有價資源進行再利用或處置。

該制度於2005年隨著「核反應器規制法」的修訂而在日本引入，旨在提高除役作業的效率並有效利用資源。

目前，日本原子能公司、中部電力公司和日本原子能機構已開始根據解除管制制度對該類廢棄物進行再利用。例如，清理後的金屬會被重新用於製作長凳和桌子，清理後的混凝土則會重新用於製作路基等。

依日本原子力文化財團網站中核能與能源圖面集(原子力・エネルギー一図面集)的說明，解除管制制度審查標準如圖 2-15。

解除管制制度概述



圖 2.15：解除管制制度概要(摘自核能與能源圖面集網站)

2.4.4 放射性廢棄物處置設施

簡單概述對於低放射性廢棄物與高放射性廢棄物的處置設施構造。

對於低放射性廢棄物的處理，首先須置於貯存桶，而後將貯存在桶中的低放射性廢棄物埋置於設施中，設置多重屏障加以嚴密封閉，並徹底管理。低放射性廢棄物埋設構造示意圖如圖 2-16。

低放射性廢棄物掩埋場的結構和土壤覆蓋

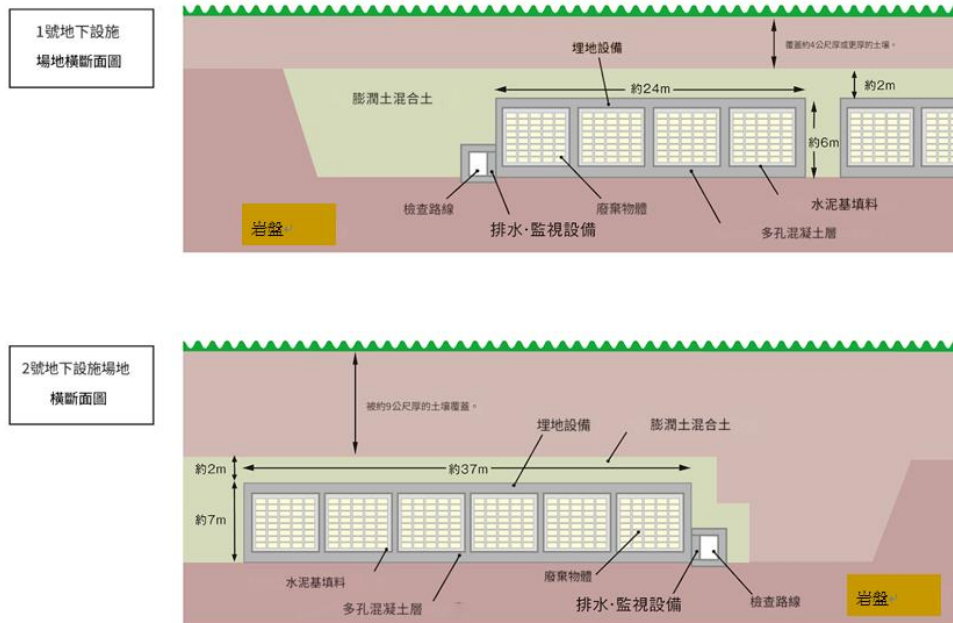


圖 2.16：低放射性廢棄物埋設構造示意圖(摘自核能與能源圖面集網站)

對於高放射性廢棄物的處理，經再處理提取可再利用之鈾、鈾等元素後，再將其餘物質進行玻璃固化，也就是玻璃化廢棄物，再將玻璃化物質貯存於貯存設施，該設施設有貯存管，每根貯存管內垂直堆放九根玻璃化廢棄物。冷卻方式則採間接自然風冷方式，冷卻空氣從貯存管外部通過，避免與玻璃化廢棄物直接接觸。高放射性廢棄物的貯存概念圖如圖 2-17。

高放射性廢棄物(玻璃化廢棄物)貯存概念圖

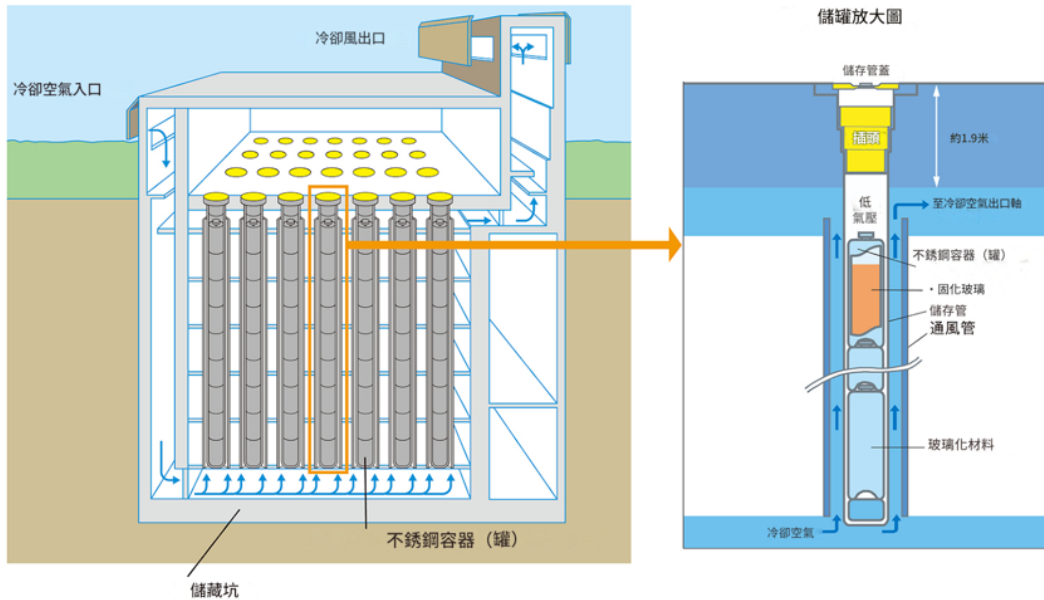


圖 2.17：高放射性廢棄物貯存構造概念圖(摘自核能與能源圖面集網站)

2.4.5 放射性廢棄物處置實例

本節以濱岡核電廠除役廢棄物的處理規劃，說明核電廠除役廢棄物處理方式。

濱岡核電廠除役作業，預估 1、2 號機組總計將產生約 45 萬噸除役廢棄物。依據是否存在放射性污染及污染程度，將分類為「非放射性廢棄物」、「無需作為放射性物質處理之物品」(符合解除管制制度)以及「低階放射性廢棄物」，各種廢棄物的概估^[13]比例如圖 2-18。

整個待拆除設施需要拆除的材料數量（1號和2號的總和）

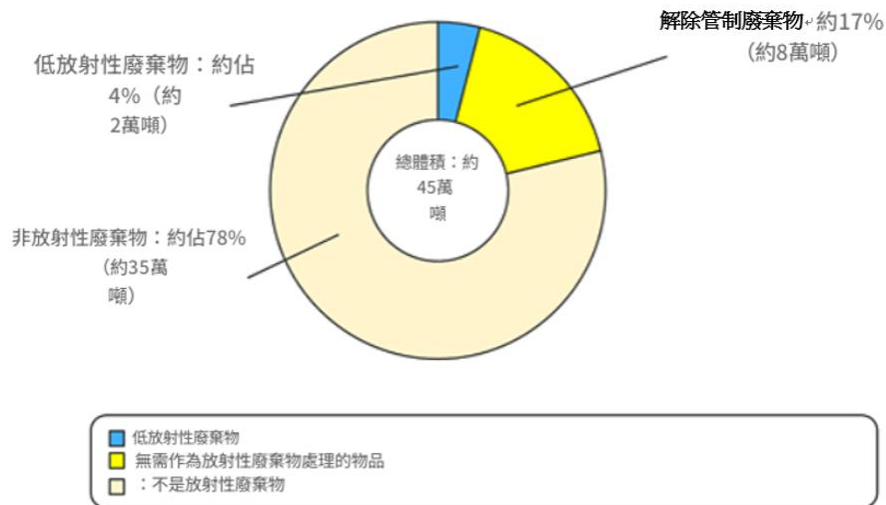


圖 2.18：各類廢棄物比例圖(摘自中部電力網站)

- (1)非放射性廢棄物：比例約占 78%，該類廢棄物來源，係經確認未受污染之設備，包含戶外監測區在內之非輻射管理區域設備，以及輻射管理區域內之設備，均可作為一般廢棄物處理。
- (2)無需作為放射性物質處理之物品（解除管制廢棄物）：比例約占 17%，輻射濃度極低，經國家確認後可回收再利用之物品
- (3)低階放射性廢棄物：比例約占 4%，作為放射性廢棄物處理之物品，依輻射等級分為三級，分別為放射性強度極低(L3)、放射性強度較低(L2)、放射性強度較高(L1)。

因應除役所產生的拆除廢棄物，將盡可能進行回收再利用；至於放射性廢棄物，在最終處置方法確定前，將安全存放於 1、2 號機廠房等處。關於處置地點，因涉及國家核能政策，營運業者將密切關注國家動向，透過業界協作共同研定具體處置方案後，再推進廢棄物最終處置地點的評估工作。一般處理程序如圖 2-19。

廢棄物將根據其放射性水平進行分類，並進行適當的處置和處置。

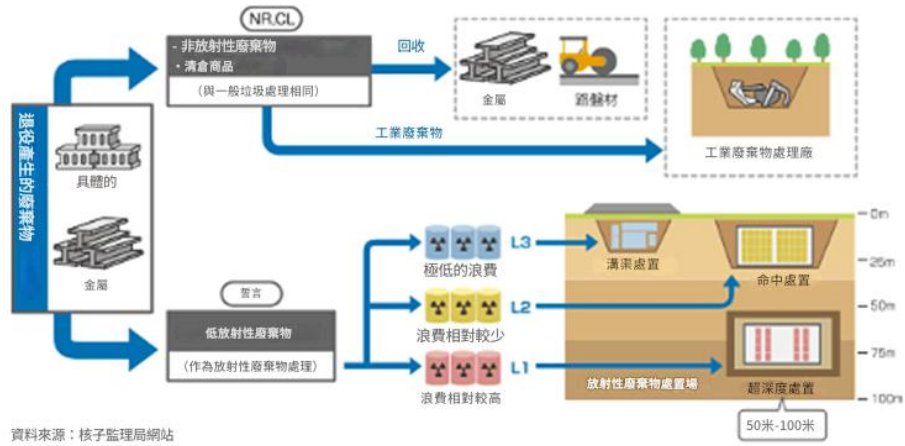


圖 2.19：各類廢棄物處理流程示意圖(摘自中部電力網站)

符合解除管制制度的廢棄物，則依規定流程，經申請同意後，進行回收再利用，其流程大致為：

考慮量測和評估方法，向監管單位提出申請。

→監管單位審查量測和評估方法，經監管單位同意

→依所提方法，量測放射性強度

→放射性強度符合規定，同意申請

→所申請物品進行回收再利用

2.5 管制建議

本研究計畫對於日本在核電廠除役計畫審查、各階段劃分、安全管理、人員進出管制、廢棄物處理等各方面均可有所瞭解，對於我國除役作業的進展有頗多足以參考借鏡之處

2.5.1 管制要項建議

本節歸納日本核電廠除役作業案例，並參酌國內核電廠情況，彙整日本除役各階段與人員進出管制、廢棄物處理等方面之管制要項建議，以供管制單位作為參考，建議如表 2-9。

表 2-9：管制要項建議

項 目	管 制 要 項 建 議	備 註
除役過渡階段	(1) 整體除役作業規劃。 (2) 核燃料及用過核燃料等移除計畫。 (3) 進行廠房設備除污、受放射性污染區域等輻射評估作業調查。 (4) 整體風險評估。 (5) 拆除未受放射性污染之系統設備。 (6) 興建除役過程中所需建物或暫存設施。	
除役拆廠 (非反應器區域)	(1) 依調查結果執行系統設備除污工作 (2) 進行設備及設施的拆除作業，主要目標在拆除反應器周邊的低輻射設備等相關設備。 (3) 規劃反應器爐體拆除工法及流程，明確化爐內結構物、反應器壓力槽、反應器圍阻體拆除工法。 (4) 檢討須納入拆除或需增設之設施、設備。	
除役拆廠 (反應器區域)	(1) 拆除反應器本體及其相關設備。需待輻射強度下降後，反應器所在區域才開始進行拆除。 (2) 依拆除進度，隨時檢討拆除工法，及需新增設之設備。	
最終監測及復原	(1) 主要在拆除廠房建物，恢復土地原貌。 (2) 最終狀態檢測，確認輻射水準符合法規解除標準。 (3) 文件資料整理與存檔。 (4) 向主管機關申請解除管制。	
作業安全管理	(1) 進出管制：依輻射強度設置不同區域、設置監控系統，管控進出人員資格、對於人員進出依規定進行查核。 (2) 輻射安全管理：依規定對於人員、物品與環境進行輻射劑量量測、作業時應穿著適當防護裝備、拆除之設備與作業人員經適當方式除污，並經過檢測。	

	<p>(3)設備操作：須由具資格人員，對於經檢證合格設備依規定進行操作、對於操作過程中粉塵與廢棄物須加以控制、定期進行設備維護。</p> <p>(4)廢棄物管理：廢棄物需加以分類，並分別加以不同方式之處置、視狀況進行環境監測。</p> <p>(5)緊急應變：制定緊急應變計畫，、設置適當緊急應變裝備、模擬的緊急狀況，規劃應變方案，使相關人員均能了解。</p> <p>(6)異常事件：對於異常事件加以記錄，確實釐清產生原因及影響，檢討改善作業程序及規定。</p>	
<p>人員進出 管制</p>	<p>(1)依據輻射風險分區：依輻射強度的不同，規劃不同區域劃分，設置符合實際情況之管理方式。</p> <p>(2)進出許可管制：提前審核並給予輻射工作人員或其他被允許人員進出許可、出入口進行監測，對人員進出進行持續監控、不同管制區域，對於人員與物品進出依規定進行查核。</p> <p>(3)護具與檢測：進入管制區域的人員佩戴個人劑量計，按規定穿著防護服、離開有污染風險的管制區域時進行檢測，發現污染，需採取除污等措施。</p> <p>(4)防止非法侵入：除指定的出入口外，他處一律不得進出、對建築物設置堅固的屏障、防止電信入侵及透過電信電路進行破壞。</p>	
<p>放射性廢 棄物管理</p>	<p>(1)廢棄物分類與概估廢棄物數量。</p> <p>(2)符合解除管制制度物品進行申請，並規劃再利用。</p> <p>(3)對於放射性強度極低(L3)、放射性強度較低(L2)、放射性強度較高(L1)規劃貯存區域。</p> <p>(4)興建放射性廢棄物暫貯設施及處置設施。</p>	

3. 國際核電廠除役期間 RPV 拆除作業等關鍵要項與技術資訊實例 研究

3.1 緣起與內容概要

因應國內核能電廠除役管制需求，需參考國際核電廠拆除案例經驗，參考國際核電廠拆除案例經驗，因此蒐集美國、西班牙核電廠反應器壓力槽拆解實務案例經驗與德國核電廠除役拆解安全報告等資料，提供管制單位該注意的事項。

本報告蒐集美國、西班牙核電廠除役實務案例經驗，瞭解切割技術運用實際經驗及作業時可能所遭遇之困難及改善作為或注意事項。另研析德國 Kernkraftwerk Brunsbüttel 核電廠(以下簡稱 KKB)除役及拆除安全報告與其許可安全評估報告等相關文獻，報告中可知在拆除作業前包括基本系統維持運轉、作業場地空間清理、對於待拆物的輻射特性分析、後續廢棄物分類等注意事項及其主管機關審查安全報告時的依據。這些經驗可供國內核電廠規劃拆除計畫時參考。

最後彙整國際核電廠拆除實務經驗及注意事項資料，分析核電廠在規劃反應器壓力槽拆除作業時應注意事項，供主管機關於審查反應器壓力槽拆解作業計畫之參考。

3.2 國際核電廠反應器壓力槽拆除案例經驗

本章蒐集曾經運用於 RPV 拆除之切割技術^[16]及美國、西班牙核電廠反應器壓力槽及其內部組件拆除案例經驗，包括拆除過程中所遭遇之困難、改善作為及注意事項，接下來分別說明所蒐集之案例經驗資訊。

3.2.1 常見 RPV 拆解技術優缺點

許多切割技術運用都曾經被採用來進行反應器內部組件切割，例如：等離子電弧、磨料水刀技術、機械切割技術、放電加工切割技術等，亦有偏實驗性質的技術，如雷射切割技術等。以上切割方法運用於反應器壓力槽內部組件拆解的優缺點^[2]，如下：

- (1) 等離子電弧技術：切割模式為高溫、高速的等離子體產生電弧，透過熱切割待切物。優點為可快速切割、適合利用電腦控制加工。缺點為需要導電材料、會產生細小切屑，會造成污染情況及相關除污問題。另外，高溫作業會產生空浮問題。
- (2) 磨料水刀技術：切割模式為利用高速水流中含有磨料方式進行切割。優點是切割速度中等、各種材料都適用。缺點為磨料水刀中因含有磨料成分，會造成後續二次廢棄物問題。
- (3) 機械切割技術：標準銑削、鑽孔和鋸切技術。優點為切割所產生的切屑顆粒較大，可以容易過濾。缺點為切割速度較慢。
- (4) 放電加工技術：透過放電方式進行金屬切割。優點為可遠端操作。缺點為切割速度較慢、所產生的切屑極細，易造成污染與清理問題。
- (5) 雷射切割技術：使用高強度雷射切割。優點為乾淨快速。缺點為實際運用上偏實驗性質。

以上切割技術運用於反應器壓力槽拆除及內部組件拆解時，仍需要考慮待切物實際特性、現場輻射防護問題及各項切割技術相對應之優缺點問題(包括切屑收集過濾問題、設備可靠度與可能維修方式)，選用合適之切割技術。

3.2.2 Connecticut Yankee 核電廠

美國 Connecticut Yankee 核電廠^[15,16]位於康乃狄克州，反應器類型為 590 MWe 單機組壓水式反應器，如圖 3.1。1968 年起開始運轉發電，並於 1996 年底永久停止運轉。1997 年向美國核能管制委員會(NRC)提交了永久停止運轉後除役活動報告(PSDAR)。1999 年由 Bechtel 公司辦理 Connecticut Yankee 核電廠後續除役作業。

拆解切割作業考慮因素包括工作人員輻射曝露、作業現場空浮與控制、廢棄物形式與處理成本、反應器壓力槽處理等因素。大部分切割作業採用磨料水刀切割，研磨材料採用石榴石。移除下部爐心支撐板螺栓及上部爐心螺栓則是採用金屬放電加工技術。切割作業是在特別設計的切割平台上進行。另有原本作為切割和包裝反應器腰部絕緣層的遙控機械手臂「Grant Machine」，如圖 3.2，在後續作業證明可有效移除壓力槽內設備與軟管，且可有效吸除切屑。

Connecticut Yankee 核電廠除役拆除經驗回饋：

(1)磨料水刀切割技術在其他設施已有成功使用經驗，但在 Connecticut Yankee 核電廠則因使用的設備尚未完善，因此導致故障與延誤，其原因如下：

- A. 磨料進料和切屑輸送軟管在切割作業過程中產生阻塞，導致設備故障需更換零配件。
- B. 因為故障關係，未能依原本規劃進行切割，需要重新切割。這個問題導致後續裝入容器上產生困難。
- C. 為解決故障問題，需要頻繁更換切割噴嘴。

上述因素導致切割時間更長，並產生更大量切屑需要去處理。

(2)水質過濾系統(如圖 3.3)目的在收集產生的切屑，並保持池水透明

度。但這部分所遇到的問題如下：

A.切屑產生的速度過快，導致無法及時收集切屑。

B.過濾管道產生堵塞，導致過濾效率降低，池水可見度將會下降，影響切割作業。

C.雖然過濾設備位於水面下，可降低人員操作期間所受到輻射曝露，但是難以維護與設備更換，維護或設備更換時都須將設備移出水面，維修更換零配件將導致人員高輻射曝露量。

(3)由於作業過程中遭遇上述問題，導致工作人員輻射曝露超過預估值，因此在後續維修作業中採取減少輻射曝露的措施：

A.使用額外輻射屏蔽減少可能輻射曝露。

B.經常使用高壓沖洗，將物體表面的污染物除去，減少可能的污染擴散與劑量率。

C.設置低輻射等候區，供工作人員監控用。

(4)Connecticut Yankee 核電廠對於待切物切割規劃，原則為：「減少切割數量、最大切割塊」來進一步減少作業時間。

(5)對於切割設備要仔細評估其可靠性及切割設備設計上對於維護的難易程度。

(6)規劃切割作業時，對於後續產生的放射性廢棄物處理要進行規劃。

(7)當水池中進行高輻射組件切割作業時，作業人員盡可能減少在水池上方作業時間，以減少人員可能受到的直接輻射曝露。

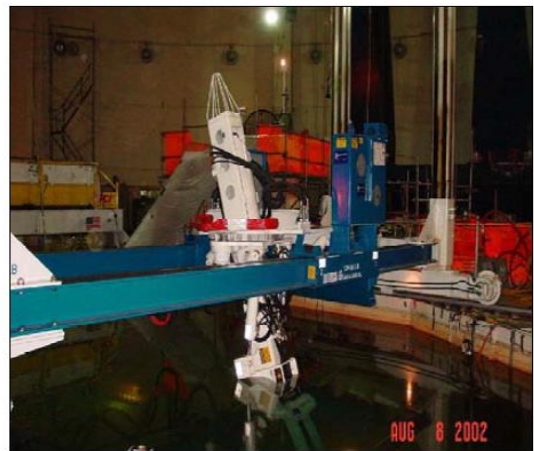


圖 3.1：Connecticut Yankee 核電廠

(圖片來源：Connecticut Yankee Decommissioning Experience Report Detailed experiences 1996-2006)



**Grant Machine
Structural Assembly**



**Cavity Vacuuming
With Grant Machine**

圖 3.2：遙控機器手臂：Grant Machine

(資料來源：Connecticut Yankee Decommissioning Experience Report Detailed experiences 1996-2006)



圖 3.3：池中過濾設備

(資料來源：Decommissioning：Reactor Pressure Vessel Internals Segmentation)

3.2.2 Vermont Yankee

美國 Vermont Yankee(佛蒙特洋基)核電廠^[17]是採用通用電氣公司生產的 BWR-4 型反應器並且使用 Mark I 型圍阻體。原發電功率為 500 MWe，於 2006 年提升功率至 620 MWe。運轉期間，Vermont Yankee 核電廠曾是佛蒙特州規模最大的發電廠。電廠是沿康乃狄克河畔建造（見圖 3.4），該廠址設備與廢棄物皆依靠公路與鐵路運輸，其中鐵路運輸為反應器壓力槽(RV)與反應器壓力槽內部組件(RVI)切割後運輸的主要方式。

2014 年 12 月 Vermont Yankee 核電廠正式停止運轉，並向美國核能管制委員會(NRC)提交了「永久停止運轉後除役活動報告」。2022 年底，由奧拉諾除役服務有限公司(ODS)完成 Vermont Yankee 核電廠反應器壓力槽與壓力槽內部組件的全面切割、包裝與處置作業。因為反應器壓力槽尺寸以及相關交通運輸可選擇的方式，Vermont Yankee 核電廠反應器壓力槽成為美國首次針對商業運轉的沸水式反應器進行全部分段切割作業案

例。2022 年底，奧蘭諾除役服務公司在 Vermont Yankee 核電廠完成反應器壓力槽及內部組件拆解、包裝與處置工業。拆解切割作業採用多種技術實現，考量因素有反應器幾何結構(包括輻射特性)、包裝方案及現場環境輻射所帶來的挑戰。拆解切割作業分成乾式與濕式，並搭配遠端操作方式執行，以使現場人員所受劑量率可以合理抑低 (ALARA)。

反應器壓力槽頂蓋及內部組件(上部)切割作業採用鑽石線鋸(DWS)完成。在頂蓋表面塗佈污染固定劑並焊接定位導板以輔助切割方向與起始點後，於空氣環境中完成切割。蒸汽乾燥器也在乾燥條件下利用鑽石線鋸完成切割作業。

具有高輻射的反應器內部組件(如汽水分離器(如圖 3.5、圖 3.6)、汽水分離器護罩上部(如圖 3.7)、下爐心支撐板、爐心護罩及噴射泵)均在水下進行切割與包裝。採用水下鑽石線鋸系統切割，其餘高輻射組件採用遠端遙控磨料水刀切割系統，可以精準切割多種材料特性。

反應器壓力槽部分採用大型專用圓盤鋸(具整合式起重功能)與固定式熱切割系統組合進行切割。反應器壓力槽、頂蓋及內部組件(上部)屬於低放射性廢棄物，採用特製大型箱體容器裝運，並符合鐵路運輸尺寸前提下，最大化裝載容積，可以使切割作業所需之切割組件的分割數減少，大幅降低切割所需時間。

Vermont Yankee 核電廠反應器壓力槽分段切割策略/經驗如下：

- (1) 依待切割物件的輻射特性，採用乾式或濕式切割，並通常會搭配遠端作業模式。
- (2) 盡可能在規劃階段時，減少組件切割次數(縮短切割時間)，以減少現場工作人員可能曝露時間，降低工作人員輻射劑量。
- (3) 切割塊須要考慮所使用盛裝容器大小限制與廠房內吊車最大吊運

能力。



圖 3.4：Vermont Yankee 核電廠

(資料來源:

<https://www.orano.group/usa/en/our-portfolio-expertise/products-services/decommissioning-services/vermont-yankee-decommissioning>)

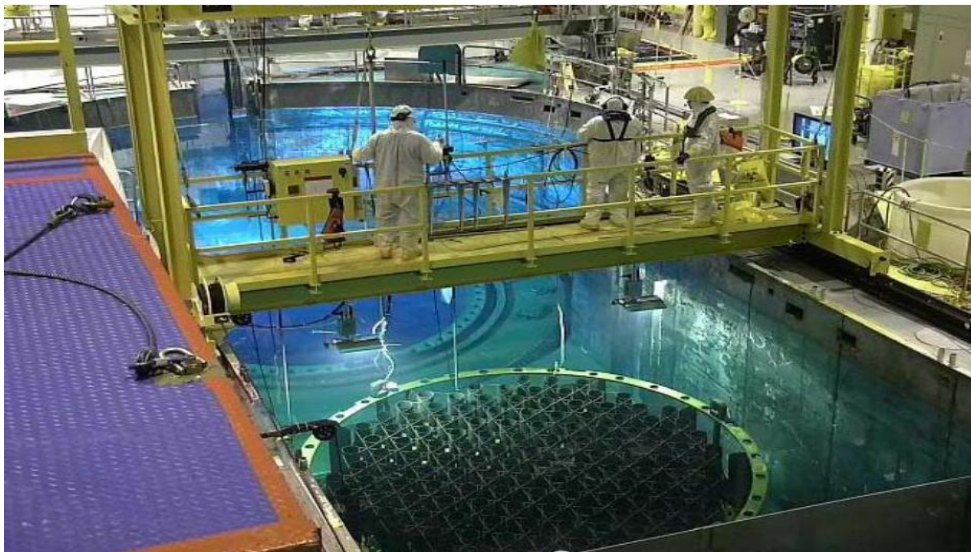


圖 3.5：汽水分離器切割作業(1)

(資料來源:

https://vydecommissioning.com/wp-content/uploads/2020/05/northstar_vt-ndcap_05-04-20_final.pdf)

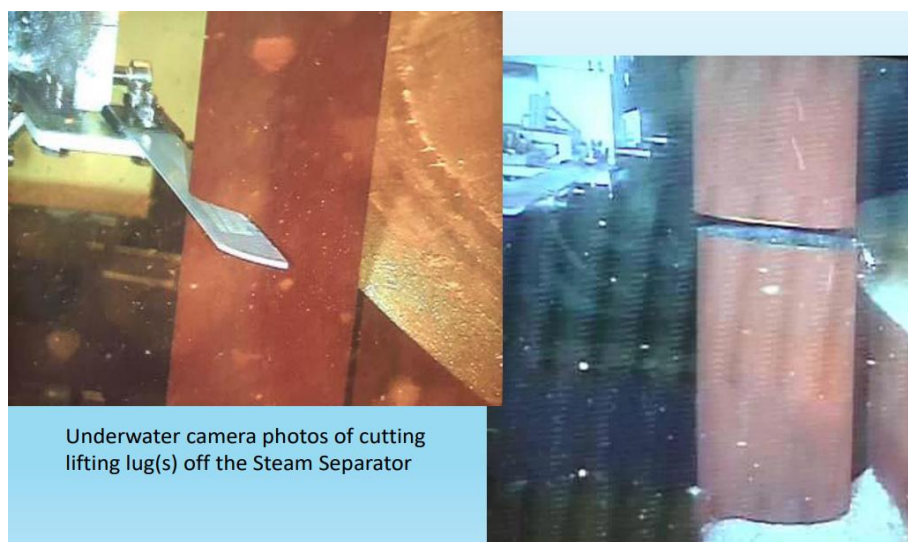


圖 3.6：汽水分離器切割作業(2)

(資料來源：

<https://vydecommissioning.com/wp-content/uploads/2020/05/vywebsite-ndcap-01-13-2020-final.pdf>)

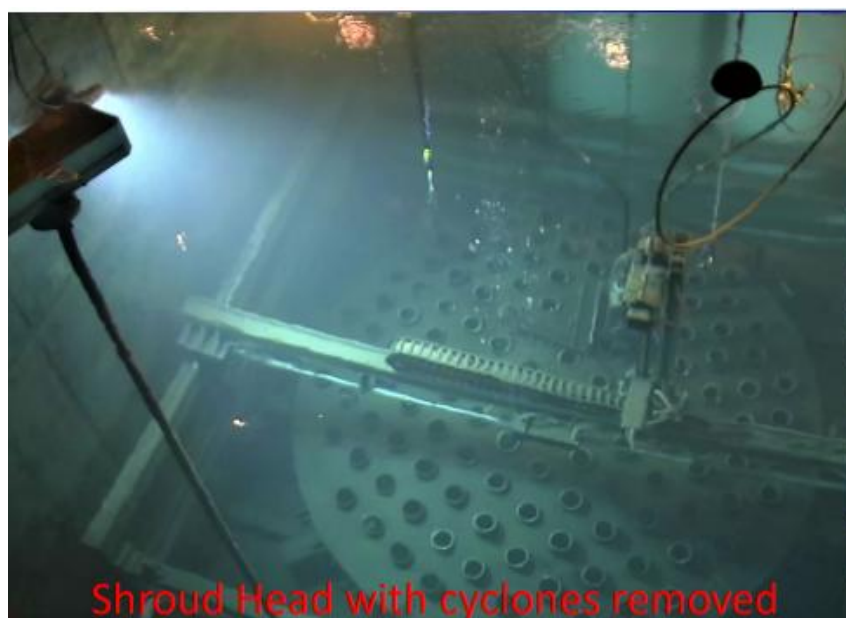


圖 3.7：汽水分離器護罩上部移除作業

(資料來源：

https://vydecommissioning.com/wp-content/uploads/2020/05/northstar_vt-ndcap_05-04-20_final.pdf)

3.2.3 José Cabrera 核電廠

José Cabrera 核電廠(如圖 3.8)為西班牙第一座拆除的壓水式反應器^[18]，電廠運轉期為 1968 年到 2006 年。2010 年由 Enresa 公司(國家放射性廢棄物公司)成為該核電廠的所有權者並進行 José Cabrera 核電廠除役作業。

為準備 José Cabrera 核電廠除役作業，於 2006-2007 年針對反應器冷卻系統(包括反應器壓力槽)進行全系統除污。壓力槽內部組件拆除與切割作業前，包含必要廠區改建工程、設備供應等作業。

壓力槽及內部組件依照其輻射照射程度，被區分低放射性廢棄物與非低放射性廢棄物，如圖 3.9。廢棄物容器在整個拆解作業扮演重要角色，因為容器尺寸決定可切割的切割塊尺寸上限，低放射性廢棄物容器採用西班牙製造的 CE-2A 與 CE-2B 容器，非中低放射性廢棄物容器則採用 MPC 容器，如圖 3.10。作業前所有切割計畫均須進行詳細規劃，且全面評估內部組件輻射狀況，及現場作業環境輻射狀況。所有作業程序(包含切割、拆解)及拆解工具的設計均須在現場作業開始前完成測試。在考量輻射防護與包裝限制等因素，詳細的 3D 建模是工具設計最重要的基礎，作為制定切割作業流程及後續裝入廢棄物容器提供最佳策略，完善的規劃可以使作業順利，人員所受輻射曝露更合理抑低。

設備與人員會在專門設計的測試設施中完成測試後，才將設備運往作業現場。切割技術採用機械切割，並且在用過燃料池中執行切割作業。測試作業在西屋的測試設施中進行，該設施具有 1:1 比例模型。模型測試是驗證設備功能並降低現場風險的重要步驟，如圖 3.11。

切割作業前的準備工作，如切割反應器腔室與用過燃料池間的隔牆移除(以便後續內部組件水下吊運)、確保用過燃料池完整性、內部組件

輻射特性分析、用過燃料架移除作業、池底與池水清潔。水池池壁密封作業由潛水員執行由池壁空隙位置注入密封劑進行封堵，如圖 3.12 圖 3.12。

反應器壓力槽上部組件切割作業前，內部組件將置放於工作轉盤上，再移入用過燃料池，工作轉盤的設計目的為協助工作人員於空間有限的用過燃料池中進行切割作業。上部組件置於工作轉盤後，運用多種圓盤切割工具與剪切工具進行切割，如圖 3.13。上爐心筒壁切割設備採用帶鋸進行，如圖 3.14。下部組件切割設備採用帶鋸進行，如圖。爐心區域採用與上爐心筒壁相同策略處理。下部組件則採用帶鋸及多種圓盤切割工具。反應器壓力槽切割作業前，也需吊運至用過燃料池(如圖 3.15)，再利用帶鋸設備切割壓力槽，如圖 3.16。

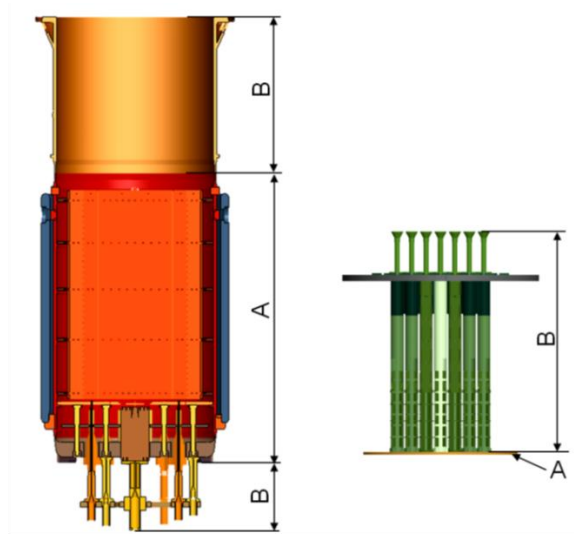
José Cabrera 核電廠除役拆除經驗回饋：

- (1) 準備工作至關重要，必須要詳細規劃。
- (2) 由於壓縮空氣與供水等廠區基本系統暫停運作，會使準備工作更為複雜。
- (3) 機械切割法在處理反應器壓力槽與壓力槽頂蓋時具有顯著成果。
- (4) 使用額外水質過濾系統以清除切割作業產生的切屑。
- (5) 作業現場可靈活組合的工具，其應用價值顯著，特別是運用於反應器壓力槽內部組件拆解時，許多設備得以重複使用，使得效率提升。



圖 3.8：José Cabrera 核電廠

(資料來源：Enresa 官網)



(A為非中低放射性廢棄物、B為低放射性廢棄物)

圖 3.9：反應器壓力槽及內部組件廢棄物劃分

(資料來源：Feedback From José Cabrera Plant Decommissioning Project，WM2014 Conference)

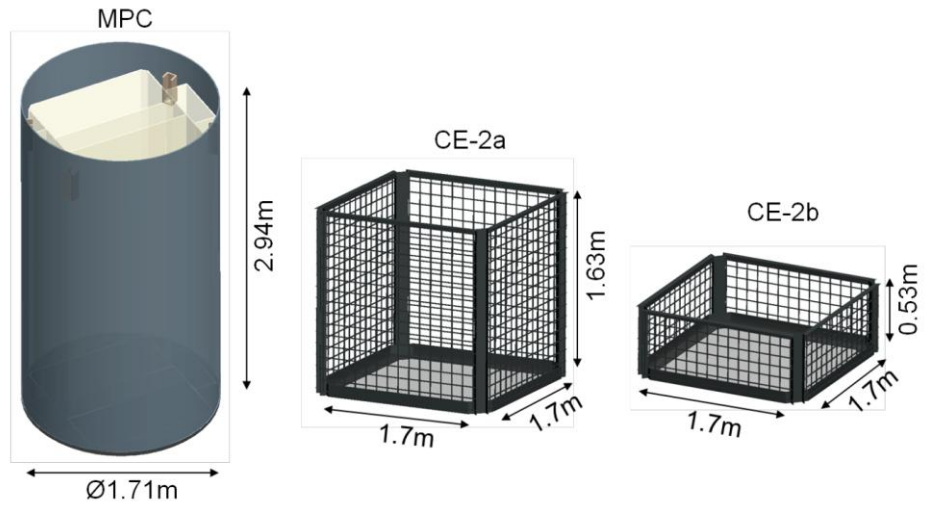


圖 3.10：CE-2A、CE-2B 容器與 MPC 容器

(資料來源：Feedback From José Cabrera Plant Decommissioning Project，WM2014 Conference)

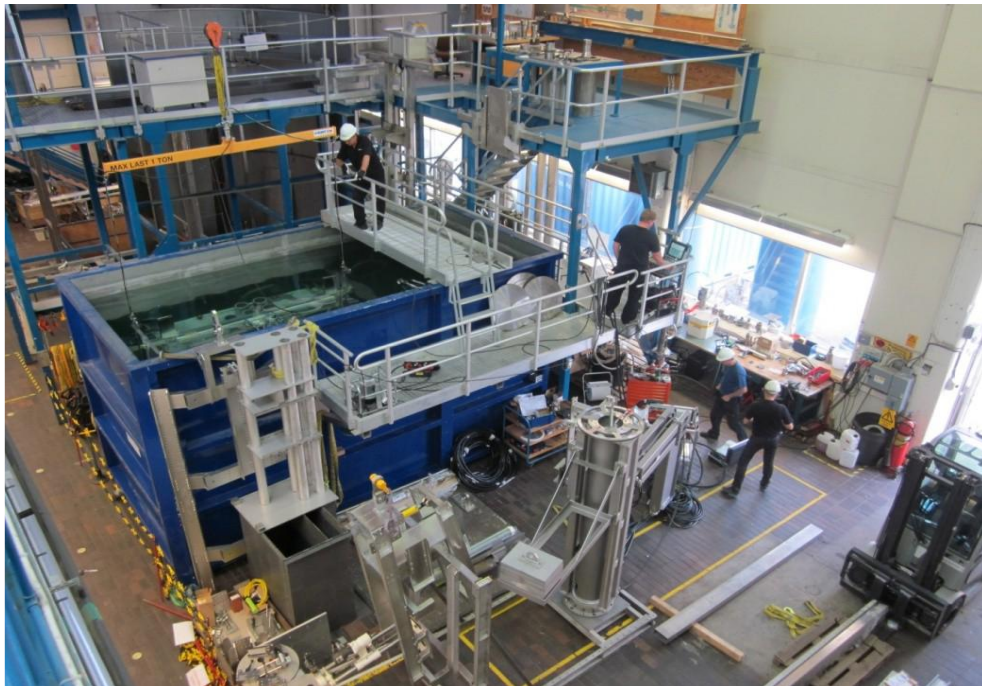


圖 3.11：西屋驗證設施現場

(資料來源：Feedback From José Cabrera Plant Decommissioning Project，WM2014 Conference)



圖 3.12：潛水員執行洩漏緊固作業

(資料來源：Feedback From José Cabrera Plant Decommissioning Project，WM2014 Conference)

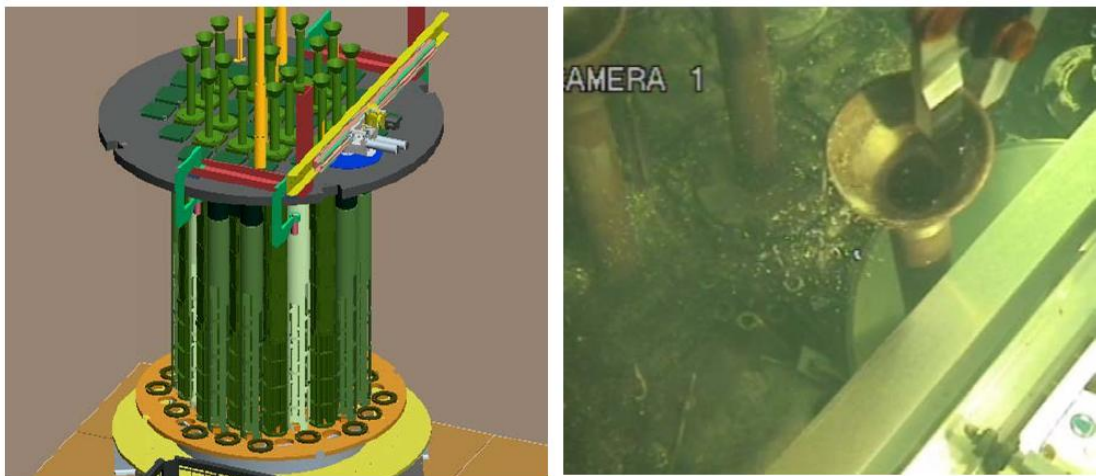


圖 3.13：上部組件護套管切割作業

(資料來源：Feedback From José Cabrera Plant Decommissioning Project，WM2014 Conference)

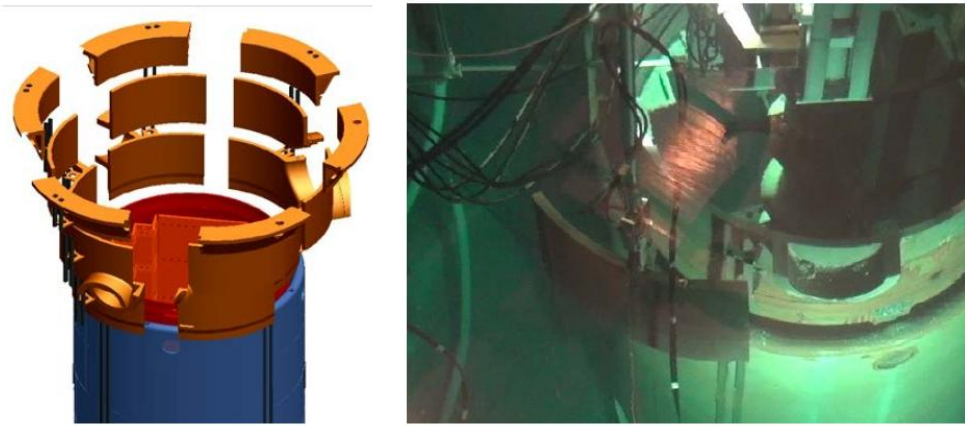


圖 3.14：上部爐心筒壁切割示意圖

(資料來源：Feedback From José Cabrera Plant Decommissioning Project，WM2014 Conference)

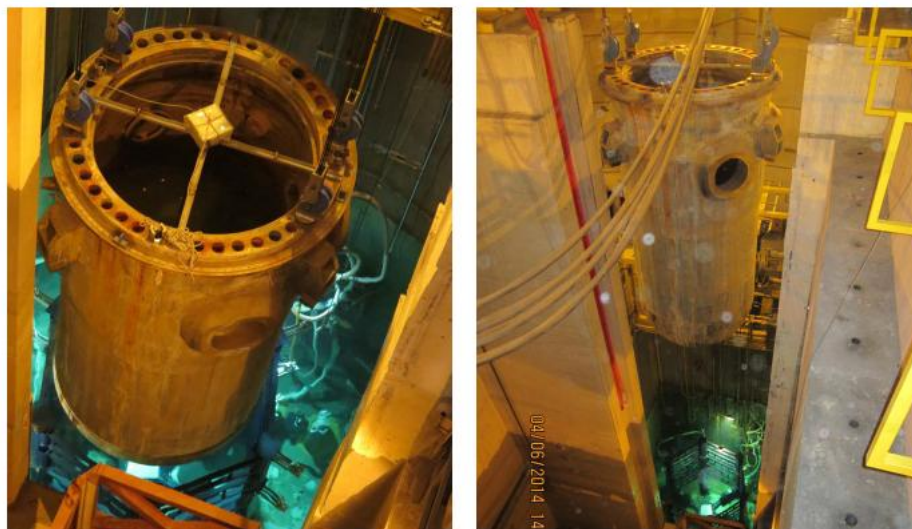


圖 3.15：反應器壓力槽吊運作業

(資料來源：Feedback From José Cabrera Plant Decommissioning Project，WM2014 Conference)

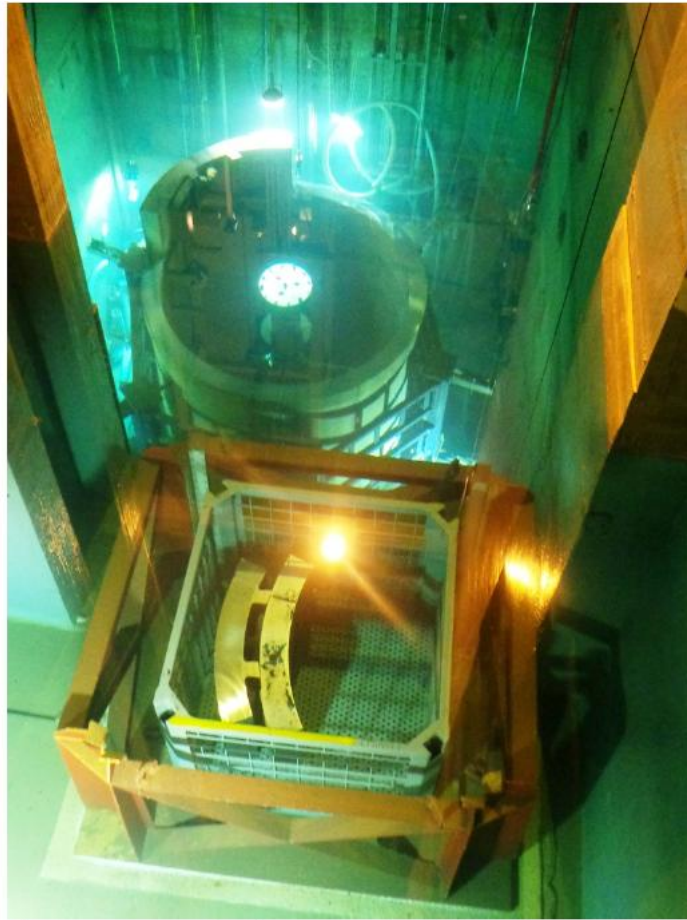


圖 3.16：反應器壓力槽與廢棄物容器及切割件

(資料來源：Feedback From José Cabrera Plant Decommissioning Project，WM2014 Conference)

3.3 反應器壓力槽拆除案例-KKB 核電廠除役及拆除安全報告

本節彙整「KKB 核電廠除役及拆除安全報告」^[19]關於「KKB 核電廠除役概要」、「工作區域準備」、「設施拆除」、「放射性廢棄物處理」、「輻射防護」、「意外事件評估」等章節內容。

3.3.1 除役概要

KKB 核電廠根據德國原子能法第 7 條(3)規定於 2012 年提送除役與拆除申請，除役與拆除規劃分為兩個階段。第一階段將開始調整尚

需保留的操作系統，使其符合拆除要求，或以新系統取代。主要涉及以下供應和監控系統：

- A. 通風系統
- B. 廢水與廢棄物處理設施
- C. 電力供應／電氣設備
- D. 供應系統
- E. 放射性活度監控
- F. 通訊設備
- G. 防火系統
- H. 起重設備、電梯與運輸車輛

上述之替代系統可以建立在管制區外，如供應和監測系統。將系統線路或管道由管制區外連接至需要拆除設備組件的房間。確保不會發生向外部造成放射性物質擴散。在廠房內，必要的管道應與現有基礎設施的系統分開鋪設，以免影響拆除工作。在將現有基礎系統調整至停止運轉狀態並建設新基礎系統的同時，將開始拆除該設施。為準備圍阻體（SHB）和反應器壓力槽內部組件的拆除工作，將對通往圍阻體現有入口和反應器壓力槽的運輸路線進行改裝，並設置新的入口。此外，將拆除不再需要的設備組件，例如平台、管道、閘門、電氣和控制技術組件等設備。反應器壓力槽頂蓋和反應器壓力槽內部組件將在第一階段進行拆除。

第二階段拆除，新的臨時基礎系統開始運作後，並在滿足安全要求的前提下，將進行後續剩餘設備組件拆除。在反應器廠房中，第二階段拆除將拆除反應器壓力槽和生物屏蔽體。反應器壓力槽的拆解有多種方式，例如原本位置進行拆解後，再移至切割作業區進行後續切割作業。

此外，所有剩餘的受污染和/或活化設備組件都將被拆除，並完成第一階段拆除中未完成的作業。第二階段將隨著當時仍存在的建築結構和廠區從《原子能法》中解除管制而結束。除役時程如圖 3.17。

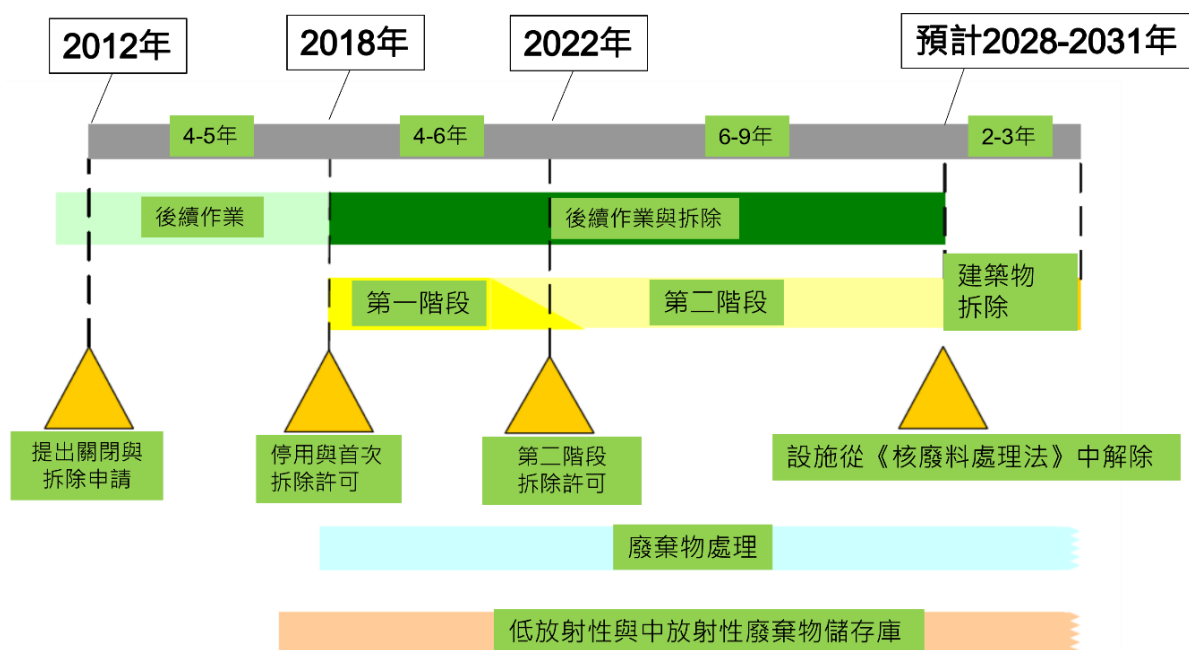


圖 3.17：KKB 核電廠除役時程

(資料來源：Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Brunsbüttel Sicherheitsbericht)

對於周遭環境輻射影響，特別是拆解過程中產生的空浮放射性物質，將會透過多項措施最大限度地保留在廠區內。通過有計畫的拆除工作，以及維持基礎系統運轉（包括通風和廢水處理系統）來確保符合「限制輻射曝露」及「避免放射性物質外洩」的目標。例如，採取以下措施：

- A. 通風系統確保維持負壓和定向氣流
- B. 持續監測排氣煙囪所排放的空氣其放射性狀況
- C. 如果外釋室內作業現場有高空浮危險，則額外使用移動式過濾設備

D. 如果發生設備儀器操作故障，例如電力供應中斷，則停止拆除工作

透過測量判斷是否符合排放限值，控制排放廢水所含放射性物質總量。

3.3.2 工作區域、拆除程序和設施

(1) 工作區域

為進行拆除工作，將設置多個工作區域。這些工作區域包括：

A. 切割/拆解作業區域

廠房內設備各個組件預計會在現場拆解，而乾式切割/拆解作業區通常配備以下設備：

- a. 拆解工具，如帶鋸機、切割用的火焰設備
- b. 隔間設施
- c. 移動式或連接系統的空气過濾系統
- d. 起重設備和屏蔽裝置(視需求)

濕式切割/拆解作業區作為將已活化組件拆解區域，通常配備以下設備：

- a. 拆解容器(必要時配備拆解架)
- b. 移動式或連接系統的水質過濾系統
- c. 切割裝置
- d. 移動式或連接系統的空气過濾系統

B. 作為緩衝的儲存區

對於無法立即運往下一個工作區域的材料，將設置堆放或緩衝儲存區域。堆放區域將在 KKB 管制區內的適當位置設置。在管制區外

區域，另設置其他獨立的緩衝儲存區，用於存放 KKB 拆除的設備組件以及在廠房加工和處理的物料。緩衝儲存區的設置將遵循相關規定和法規。緩衝儲存將使用合適的包裝或容器進行。在停止運轉和拆除期間，由於在廠區內貯存和處理放射性物質以及進行運輸和準備作業，將產生額外的直接輻射。為確保符合輻射曝露限值，並根據《輻射防護條例》第 6 條的規定，將輻射曝露降至最低，將採取適當措施，例如使用屏蔽、保持距離或優化容器在緩衝貯存區域的擺放位置。

C. 廢棄物除污作業區

為將受污染的組件進行除污，將設置除污設備。該設備將安裝於廠房以及 KKB 管制區內現有的其他合適地點。組件的除污工作主要應在廠房內進行，但也可由合格的外部服務供應商在廠區外進行。

D. 廢棄物處理區

放射性廢棄物在管制區或設施外進行處理。管制區現場處理地點主要在廠房內進行。拆除後產生的放射性廢棄物，例如反應器壓力槽、反應器壓力槽內部組件和生物屏蔽等組件，在水下拆解過程中，可以使用適當的設備將較小的切割塊在水下壓實減容。

E. 廢棄物輻射量測區

在管制區或監測區中，劃定可進行放射性測量的作業區域。在選擇區域時，應注意作業區域背景輻射狀況，避免影響測量結果。廢棄物輻射量測區應區分為分類檢測區域及外釋測量區域，透過區域劃分、適當的通風措施和行政規定來避免再污染和污染傳播。

組件拆解或後續拆解地點、除污作業區、處理區和輻射量測區的設置應在現有管制區內，最好是有獨立作業空間，如廠房空間。在設

置以上區域時須考慮工作安全、輻射防護、消防及建築相關等要求，並符合相關法律與技術規範。

(2) 拆解、除污與處理程序

A. 拆解、除污和處理有各種不同的方法。選擇標準包括：

- a. 工作安全
- b. 人員輻射曝露
- c. 放射性物質狀況
- d. 操作可靠性
- e. 二次廢棄物的產生情況
- f. 作業效率
- g. 作業所需空間
- h. 物流和運輸要求
- i. 經濟性

B. 拆解方法選擇標準：

- a. 可遠端操作
- b. 水下操作
- c. 待拆解物件材質特性
- d. 工具磨損

可選擇拆解方法(技術)有機械切割技術(應用範圍涵蓋所有材料，尤其是金屬和混凝土)、熱切割技術(透過加熱分解待拆解設備)，應視上述標準，選用適當工具(技術)。另外，選用手工具時，為盡量減少作業人員輻射曝露，必要時，需將手工具進行適當改裝，使用長桿方式減少人員輻射曝露。遠端操作拆除部分需要特殊設計的設備和儀器，或對設備進行改良以切合需求。在拆除作業中使用之前，這些

設備或儀器會進行測試。在設計用於高劑量率區域的拆除設備和儀器時，應考慮到這些設備和儀器發生故障時所需維修措施。

C. 除污程序

適當除污程序可減少工作人員輻射曝露、防止污染擴散。如機械除污、化學除污、或是電拋光、熔融或超音波除污等方法。

D. 處理程序

大部分廢棄物經適當除污作業後，經測量確認符合標準，將可重新循環使用或是以常規廢棄物處理。處理目標為減容。透過壓縮、乾燥、固化及適當包裝來達到減少最終處置的容器所需要的體積。

(3) 拆解設備

KKB 核電廠所用之拆解設備都是經測試的市售品，包括像一般手工具、銑刀、剪切工具、帶鋸和圓鋸、切割割炬等設備。為使作業人員輻射劑量降至最低，設備工具必要時要經過適當改裝，及透過長柄遙控操作拆解。拆解設備使用前都須要進行試運轉測試。在拆解高輻射劑量率物件或是在高輻射區操作時，應該要考慮拆解設備發生故障時所需採取的措施。適當設計可使設備發生故障時(如設備接頭採用快拆接頭等)縮短維修時間，符合輻射合理抑低要求。必要時利用水下攝影機監控水下作業。

3.3.3 設施拆除

根據德國法律，拆除工作的前兩個階段將從管制區域拆除受污染和活化的設施組件以及未受污染或未活化的設施組件。最後，應證明廠房建物和受影響的廠區沒有污染。在廠區獲得許可後，該設施將脫離核能管制法規監督。以下分別為拆除第 1 階段與第 2 階段工作：

(1) 拆除第 1 階段主要包括以下工作

- A. 根據拆除要求調整基礎設施；廠房內的拆除順序應考慮廢棄物處理的要求
- B. 在管制區域（主要在廠房內）建立並運作廢棄物處理區
- C. 停用不再需要或被新系統取代的舊系統
- D. 建立運輸通道
- E. 劃分及設置工作區域
- F. 設置緩衝儲存區
- G. 拆除反應器壓力槽頂蓋
- H. 拆除反應器壓力槽內部組件
- I. 拆除部分圍阻體，包括圍阻體頂蓋
- J. 拆除反應器廠房中廠房和其他設施區域的設備組件
- K. 拆除監測區域的設備組件
- L. 將設備房間和區域重新劃分為停用和拆除的用途

(2) 拆除第 2 階段將持續進行第 1 階段中已開始但尚未完成的所有工作：

- A. 拆除反應器壓力槽和底座
- B. 拆除圍阻體剩餘部分
- C. 拆除生物屏蔽
- D. 拆除管制區和其它監測區內剩餘的設備組件
- E. 拆除剩餘的仍在運轉系統
- F. 拆除廢棄物處理設施
- G. 對建築結構和受影響的廠區進行除污和檢測，並將 KKB 廠區從《原子能法》中解除管制

在拆除設施期間，仍需各種系統和供應設施來遵守「防止放射性物質外

洩」和「輻射曝露限制」，並確保工作安全進行。仍持續運作系統將持續根據現況要求進行調整，包括建立替代系統。如果新的替代系統已準備就緒，則可逐步關閉和拆除現有的舊系統。新的替代系統最好由建物外（例如在集裝箱內）設置的控制室操作，並由外部向內部供應，以便持續維持運作。以下將詳細說明主要的供應設施和系統：

- (1) 通風系統，在剩餘的運營期間，最遲在設備和裝置拆除完成時，現有的通風系統將被新的臨時通風系統所取代。新的臨時通風系統最早將在拆除階段 1 開始運作，但在處理完任何殘留的破損燃料棒之前不會啟用。新通風系統的主要組成部分包括帶有過濾器 and 閘門的進氣和排氣系統、排氣監測和平衡系統、必要的輔助系統以及排氣煙囪。在設計廢氣煙囪時，將考慮其是否符合要求，例如 KTA 規則 3601/19/或事故控制的要求、廢氣排放高度變化對環境造成的輻射影響是否允許，以及對核能法規核准的建物是否有不良影響。新通風系統將根據要求進行規劃和建造。如果通風系統發生故障（例如因停電而導致），則將關閉管制區的通風系統，並停止管制區內的作業。
- (2) 廢水處理系統，在管制區域內拆除過程中產生的、受放射性物質污染的廢水將在管制區域內進行收集，並在企業廢水處理廠或相應的替代設施中進行淨化處理。處理後，水將被水泵排放入容器中，進行取樣、檢查，如果低於核准的排放值，則將水排入易北河。放射性廢水的排放監測和環境監測仍按照 REI/9/的規定和核技術委員會的規則進行。在拆除過程中，過濾器和蒸發器將停止運轉並拆除。之後根據德國法規，經使用移動式過濾器和蒸發器處理產生的廢水將其排入易北河。同樣，也可以將廢水交付給第三方處理。
- (3) 電力供應/電氣設備，在拆除電廠的過程中，將隨著拆除進度的推進，逐

步拆除、調整或用模組化設備取代電氣設備。此過程將遵守必要的安全要求。對於安全技術方面仍然需要的系統（例如火災報警系統、逃生通道照明、輻射監測測量技術等），則使用備用電源系統或電池提供電力。

(4) 供應系統，以下供應系統將繼續在必要的範圍內運轉，直到不再需要並拆除或被替代系統取代為止：

- A. 測量氣體供應
- B. 用過核子燃料池和沉澱池的水質淨化
- C. 去離子水供應
- D. 輔助蒸汽系統
- E. 供暖系統
- F. 壓縮空氣系統
- G. 排水、通風和排空系統
- H. 飲用水系統

空浮監測可偵測系統和房間中放射性空浮濃度的出現和變化。管制區排氣和廢水排放中所含放射性物質狀況都將留有紀錄。持續監測工作區域中的輻射劑量率、放射性空浮濃度和污染狀況。以上相關設備要持續運作，直到不需要並被拆除或被替代系統取代。

通信設備將在必要的範圍內繼續運轉，直到不再需要並被拆除或被替代系統取代為止。

現有的固定和移動式防火設施，以及建築、設備、組織和防禦性防火措施，將在拆除過程中根據拆除情況，並遵守法律 and 技術規定及法規，持續進行調整。如果拆除程序需要，將臨時安裝額外的設備。透過在拆除階段減少火災因子，降低火災發生風險。

現有起重機、電梯和運輸車輛可以根據現場作業要求進行調整。如有必要，將安裝新的起重機和電梯，或提供運輸車輛。如果個別情況下，假設負載墜落時可能外釋超過允許值的物質，則應考慮法規中更嚴格的要求。

拆除工作還涉及建築改動，例如開鑿牆壁和天花板開口、安裝運輸和搬運設備或在建物內設置堆放區域。這些措施均符合核能和建築法規的要求。

反應器廠房和廠房的所有區域都將改善運輸方式與作業空間。為改善運輸方式，將採取以下措施：

(1) 拆除圍阻體和反應器壓力槽中現有組件。拆除範圍包括該區域不再需要的設備組件，例如容器、平台、管道、閘門以及電氣和控制技術組件。

(2) 新建或優化起重設備

在拆除第 1 階段，還將開始拆解反應器廠房中停用的裝置。反應器廠房的所有樓層(從 A01 層到 A10 層(如圖 3.18))都將拆除。在 A10 層，即池廊層，將拆除屏蔽柵欄以及其他不再需要的工具和裝置，以便創造拆除反應器壓力槽頂蓋和反應器壓力槽內部組件所需工作區域。如果用過燃料池中的儲存架不再需要，則也將予以拆除。反應器壓力槽內部組件在拆除第 1 階段將會從反應器壓力槽中吊離至用過燃料池或沉澱池中進行拆解作業。A10 層將設置包裝及廢棄物容器處理區，如圖 3.19。用過燃料池與沉澱池工作區和反應器壓力槽作業區示意圖，如圖 3.20。包裝區、拆解設備及過濾設備示意圖，如圖 3.21。

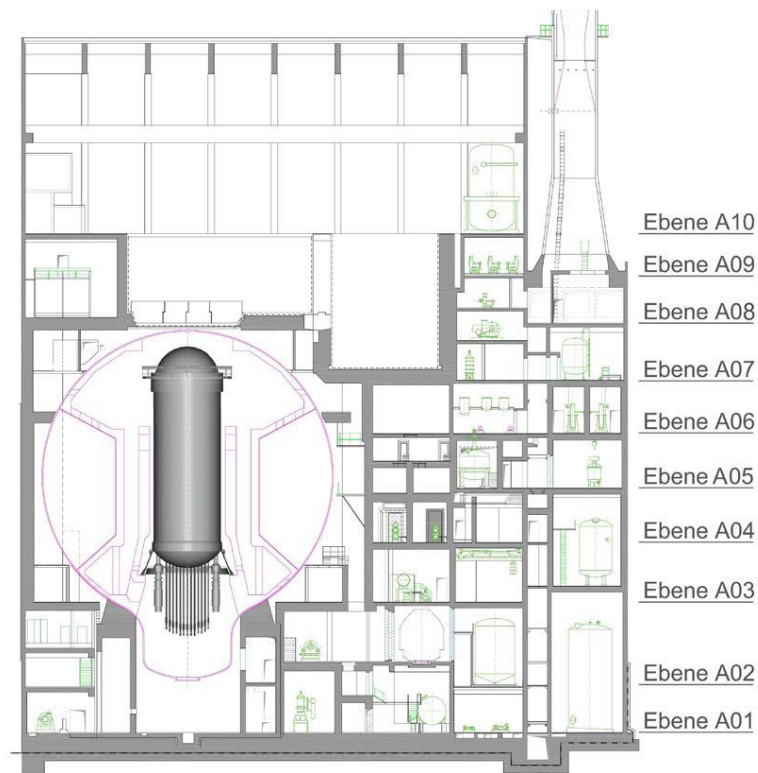


圖 3.18：KKB 反應器廠房剖面圖

(資料來源：Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Brunsbüttel Sicherheitsbericht)

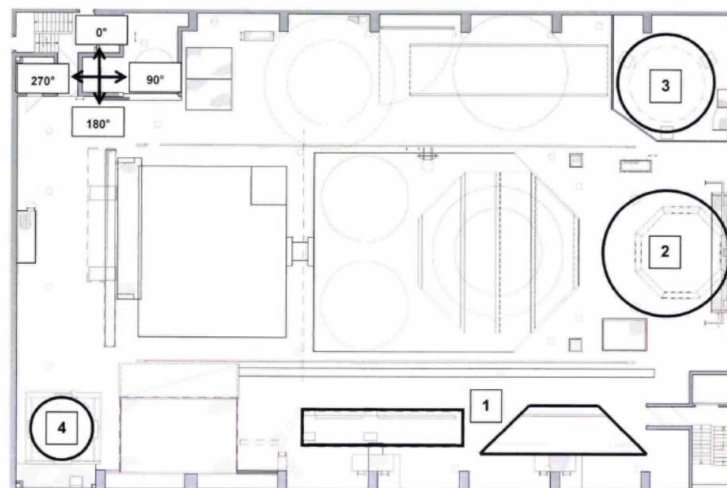


圖 3.19：KKB 反應器廠房 A10 層俯視示意圖

(拆除第 1 階段廠房 A10 層現場空間規劃，編號 1:防護螺栓放置位置、編號 2:圍阻體頂蓋放置位置、編號 3:反應器壓力槽頂蓋放置位置、編號 4:通風系統)

(資料來源：Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Brunsbüttel Sicherheitsbericht)

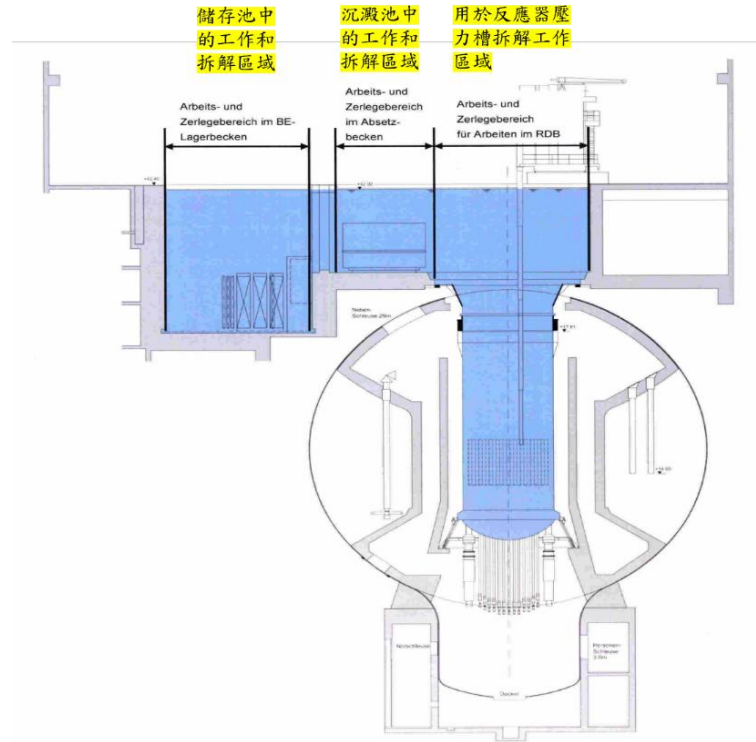


圖 3.20：儲存池與沉澱池工作區和反應器壓力槽拆解作業區示意圖

(資料來源：Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Brunsbüttel Sicherheitsbericht)

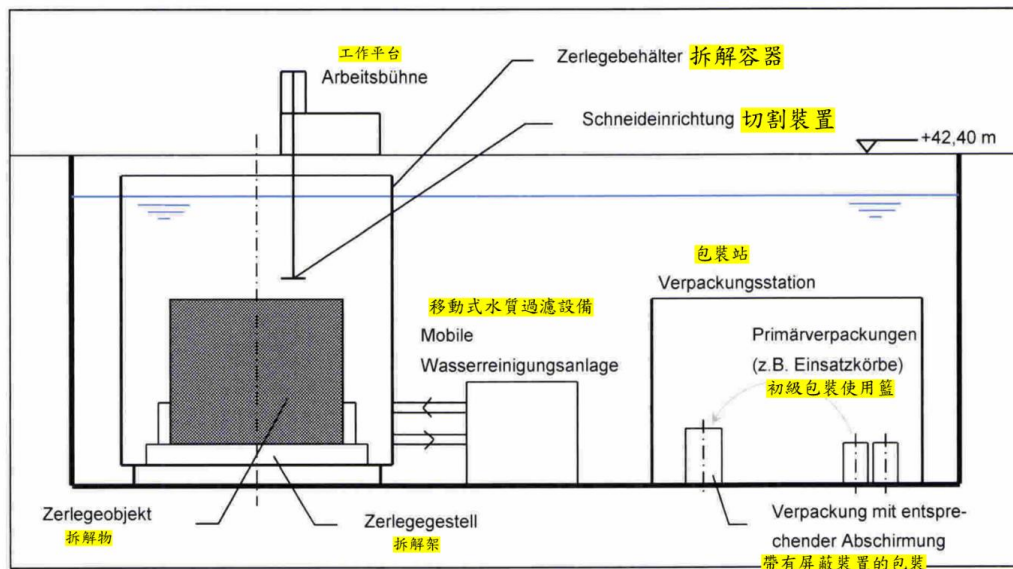


圖 3.21：包裝區、拆解設備及過濾設備的示意圖

(資料來源：Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Brunsbüttel Sicherheitsbericht)

3.3.4 放射性廢棄物處理

KKB 核電廠拆除過程中產生的廢棄物及拆解移除的廠房設備組件，必依照原子能法(AtG)規定作為放射性廢棄物或經確認後外釋、再利用等方式進行，其放射性廢棄物分類如圖 3.22。

KKB 核電廠的總重量約為 30 萬公噸。其中約三分之一為管制區外的建物和設施。該處在拆解設備組件時所產生的廢棄物未受污染，也未活化，可直接外釋。在進行必要的除污處理後，管制區域內的大部分建物和設施可被歸類為非放射性。在拆除設備組件時產生的放射性廢棄物，大部分可通過在 KKB 廠區（例如，通過擦拭進行除污）或廢棄物處理設施（例如，使用高壓噴射法進行除污）中採用適當的處理方法來外釋。在拆除的設備組件中，約有 2% 需要經批准才能進行有條件外釋。只有另外約 2% 的拆除設備組件預計需要作為放射性廢棄物送入最終貯存庫，廢棄物預估產量如圖 3.23。

對於可以外釋的廢棄物會在 KKB 廠房內進行適當除污及量測，證明符合外釋標準。外釋原則不允許以混合或稀釋方式達成。放射性廢棄物則會被裝入適當容器中，相關必要資訊將被記錄，並採取預防措施避免可能的放射性污染擴散。

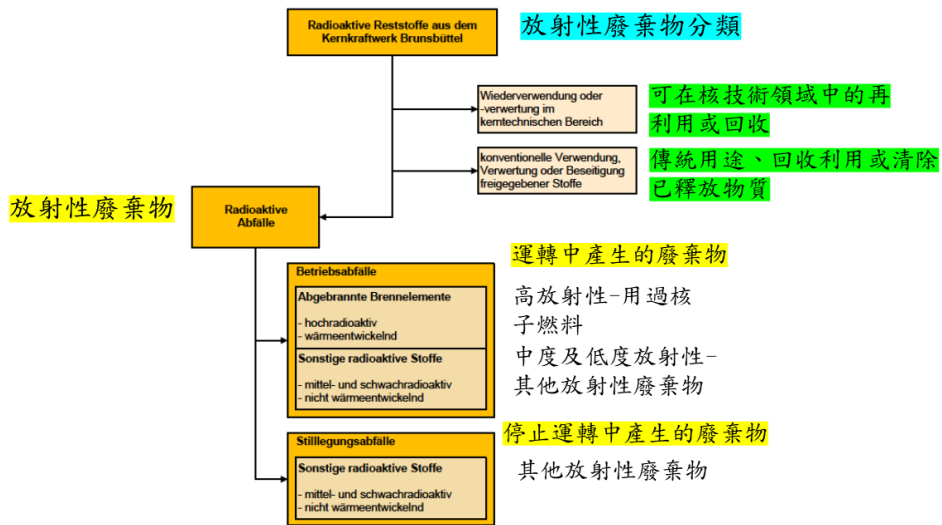


圖 3.22：放射性廢棄物分類

(資料來源：Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Brunsbüttel Sicherheitsbericht)

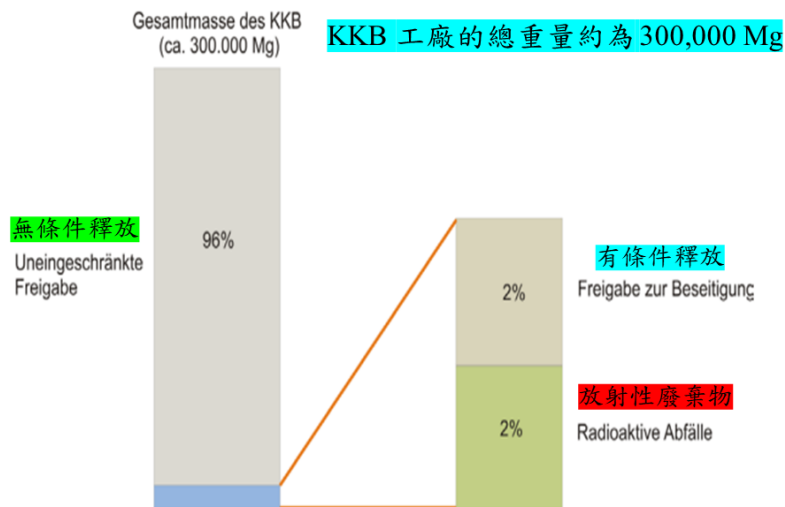


圖 3.23：廢棄物預估產量

(資料來源：Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Brunsbüttel Sicherheitsbericht)

3.3.5 輻射防護

(1) 輻射防護任務

A. 管制區的輻射劑量率測量

- B. 管制監測劑量限值
- C. 標示管制區的示警標籤
- D. 執行人員污染偵測
- E. 管制物件離開管制區
- F. 執行環境監測
- G. 監控放射性廢棄物運輸
- H. 記錄與輻射防護相關的所有流程
- I. 在計畫的措施中考慮輻射防護，並對合規性進行相關監控
- J. 工作場所輻射監控
- K. 廢棄物放行與相關資料公開
- L. 監測殘留放射性物質的處理和處置過程
- M. 參與建立和更新除役計畫
- N. 從輻射防護的角度來看之前實施的拆除措施的經驗回饋

(2) 輻射防護區域

- A. 監測區：在一年內可能會受到超過 1 mSv 的有效劑量或超過 15 mSv 的眼球晶體器官劑量，或超過 50 mSv 的皮膚、手、前臂、腳和腳踝器官劑量。
- B. 管制區：管制區是指在一年內，人們可接受有效劑量超過 6 mSv 或器官劑量超過 45 mSv (眼球水晶體) 或 150 mSv (皮膚、手、前臂、腳和腳踝) 的區域。每次人員進入管制區時，都需監測個人劑量。至少要記錄姓名、日期、時間和劑量值。離開管制區時，會對人員和所攜帶的物品進行放射性污染偵測。
- C. 管制區中的限制區：劑量率可能高於 3 mSv/h 的區域為限制區。

(3) 個人監控與個人保護措施

確保工作人員所受輻射曝露量盡可能地降低。可採取下列措施：

- A. 清除廠房設備或工作區域的污染
- B. 對於高於 3 mSv/h 的區域將管制人員進出
- C. 標示劑量率增加的區域
- D. 使用屏蔽
- E. 配合移動式過濾系統，安裝隔離設備或移動式輻射防護帳篷
- F. 保障工作場所和提供個人防護裝備
- G. 透過適當的防護措施避免個人污染
- H. 拆解過程的時間優化(縮短作業時間)
- I. 污染作業區域劃分
- J. 遠端處理與操作
- K. 作業人員應遵守的規定
- L. 輻射防護訓練
- M. 工作場所人員劑量監測

(4) 監控系統

- A. 污染監控：定期監測特定房間是否受到污染。受污染的區域會立即被劃定、標籤和除污。透過設定污染區域（例如：換鞋區）來限制污染的擴散。人員離開該區域時執行個人污染測量。
- B. 輻射劑量率監控：固定或臨時劑量率測量裝置安裝在選定的區域，其測量值會顯示在現場和/或控制室中。
- C. 空浮監控：在空浮濃度增加的情況下，輻射防護人員會逐一檢查受影響的房間區域，例如使用可攜式空浮收集器，以找出來源。

(5) 放射性活度監控

- A. 保持廠房內負壓
- B. 管制排氣
- C. 管制放射性液體排放
- D. 廢水收集與處理
- E. 使用移動過濾設備
- F. 使用屏蔽

(6) 放射性氣液體排放

對於 KKB 除役與拆除作業，申請以最大允許值排放放射性廢氣。放射性廢液排放限值將維持不變。在考慮現場作業因素，確保直接輻射、放射性廢氣與放射性廢液的輻射曝露量不超過限值 1 mSv/年。

3.3.6 事件分析

KKB 核電廠停止運轉後，由於已經達到沒有用過核子燃料狀態，事件評估上只需符合「限制輻射曝露」的目的，包括避免放射性物質外洩。分析事件類別：

A. 內部事件影響

a. 墜落

i. 反應器壓力槽內部組件和壓力槽拆解、分解和包裝過程中的吊運墜落

在拆除的第一階段，將拆除、拆解並包裝反應器壓力槽的內部裝置。對於使用符合 KTA 規則 3902 /22/ 或 KTA 規則 3905/23/ 的更高要求的起重設備或吊掛點時，可以排除吊掛物品產生墜落的可能性。否則意外墜落的發生，可能會損壞濕式拆解區域的內襯或

蓄水水封環狀結構。對於那些無法根據 KTA 規則的更高要求提供吊裝設備的組件，以及在處理拆解組件時，應假設會發生貨物墜落。吊掛物墜落到蓄水補償器上可視為影響最大的事件。此類事件輻射影響評估，對受影響最嚴重的年齡組計算得出的有效劑量約為 8 pSv。

反應器內襯結構將在第二階段進行拆解。在此階段，蓄水水封環狀結構已拆除，因此沉澱池處於乾燥狀態。在反應器內襯結構中，隨著拆解進度的推進，水位將逐步降低。假設發生負載墜落，反應器內襯結構可能會發生洩漏。但如上所述，第二階段發生該事件輻射影響評估不大。

ii. 管制區內運輸大型單一組件時發生墜落情況

管制區內運輸大型單一組件時，如果整個吊掛、起重設備未能符合 KTA 規則 3902/3905 或更高要求，則假設會發生墜落。

iii. 發生墜落時砸到放射性廢棄物或盛裝有放射性廢棄物容器

iv. 裝有放射性廢棄物容器發生墜落

v. 運輸過程中裝有放射性廢棄物容器運輸車輛發生事故

b. 安全技術重要設備的故障和影響

管制區內拆解和切割受污染及活化設備時，移動式過濾設備發生故障，應立即停止相關區域拆解作業，避免設備內部放射性物質可能的排出，也避免工作人員受到額外輻射曝露或污染。

管制區內高壓、高溫設備除需持續運轉的基礎系統外，其餘應在第 1 階段時將其冷卻且將其卸除壓力。這類設備經評估應無風險性。

由於第 1 階段時規劃於現有廠房外建置備用供應和監測系統，並由外部連接至廠內。因此，這時發生基礎系統故障或損壞，僅影響拆除工程進度，評估不會造成直接放射性物質外釋情形。

廢水蒸發器洩漏評估。假設蒸發器和蒸發器容器中的全部濃縮物洩漏，產生部分蒸發，且未經過濾就經排氣煙囪排放至外部環境，這一事件經評估，受最高污染的年齡組，其最大有效劑量為 0.019 mSv。

c. 火災

評估可能發生在廠房內的各式火災類型，如廢棄物處理區域發生火災、活性碳過濾器發生火災、系統內其他火災、離子交換樹脂熱分解時發生火災、拆解設施發生火災導致故障等。其中拆解設施可能發生的火災經評估與重要安全設施失效情況並無差別，不會對於周圍區域產生輻射影響，僅會影響拆解進度。

B. 外部事件影響

外部事件評估部分包括風暴、暴雨、降雪、雷擊、洪水、森林火災地震等情況，另外如飛機失事等外部事件評估。評估結果由於發生機率極低，有完善措施(如廣泛的防洪措施)、保護設備完善(防雷擊設備)、及距離可能發生事件位置較遠(如森林火災)，幾乎不會影響到核電廠廠房。

3.4 反應器壓力槽拆除案例-KKB 核電廠除役及拆除許可安全評估報告

本節彙整「KKB 核電廠除役及拆除許可安全評估報告」^[20]關於「審查標準」、「設施拆除」、「輻射防護」、「放射性廢棄物處理」、「意外事件評估」等章節內容。

3.4.1 審查標準

(1)以原子能法(AtG)、輻射防護法(StrlSchG)、原子能程序條例(AtVfV)

作為總體評估標準，評估所需文件有以下：

- A.安全報告。
- B.補充計畫、設備及其組件的圖面與說明。
- C.能夠驗證負責建設該設施及管理監督其運營的人員具有可靠性和專業知識的文件資料。
- D.其他參與設備運營的人員必要知識的資料。
- E.清單，包含設施及其運作安全相關資料、應對故障和事故而制定的措施及針對設施中與安全相關組件進行預定性檢查的檢查計畫。
- F.對於預計產生的放射性廢棄物進行描述，並提有相關擬定採取的措施。
- G.防止輻射傷害的技術與操作措施、程序等相關審查以輻射防護條例為基礎。

(2)在評估保護目標(安全的放射性物質封存)和輻射安全時，將根據以下文件進行評估：

- A.必須描述該地點設施與周邊環境，以及與除役相關設施的設施運營歷史。
- B.除役規劃必須包含計畫中的整體除役程序與措施及拆除步驟的實施，並且包括廢棄物外釋與廢棄物處理。
- C.應根據計畫拆除和處置方案，對待拆除設備組件的放射性初始狀態進行評估。
- D.設備組件的拆除必須經過規劃，以確保拆解過程不會影響與安全相關的重要系統和輻射屏蔽功能。此外，所申請的拆除措施不得使後

續拆除步驟變得困難或受到阻礙，意味整體拆除措施必須有順序地進行規劃。

- E. 由於申請的設施拆除將分兩個階段進行，且須獲得核能法規許可，因此必須明確第一階段實施拆除範圍，並與第二階段區分。
- F. 拆解技術審查將特別對其保護目標(輻射安全)所產生的影響進行審查。另外，還將審查是否採用有效除污程序及擬採取防止污染擴散的措施，包括建造封閉隔間/裝置、抽吸裝置和過濾裝置的必要性與合理性。在拆除作業中，應檢查準備工作、拆解和拆除過程中是否符合輻射防護要求，包括使用的技術/機具是否符合當前輻射狀況，並考慮到輻射防護原則。這意味著在現有技術現況下，即使輻射低於限值，也應盡可能減少對人和環境不必要的輻射曝露或放射污染。由於拆除作業只有獲得許可後才可進行，但在程序中必須制定相關規定，以確保在監督程序中考慮到這些要求，因此對於停止運轉後廠房系統操作中的規定是否適合輻射防護納入具體活動並實施，應該要根據個案制定相對應的輻射防護措施，例如相關系統維護修繕所需之輻射防護措施。
- G. 關於廢棄物處理部分，應檢查停止運轉和拆除過程中產生的放射性廢棄物以及拆除含放射性的設備組件是否有依照法律規定進行除污再利用或是進行放射性廢棄物分類處理。
- H. 為確保並證明有關人員和環境輻射曝露的輻射安全目標，必須在設施內部和外部進行輻射監測。
- I. 關於放射性物質排放，將可能排放的放射性濃度與法規值進行比較，並檢查遵守環境中的劑量限值及保護空氣、水和土壤所採取的預防措施是否足夠。

- J. 為了封存放射性物質並避免不必要的輻射曝露，應設有處理放射性物質設施及保護周圍人員的設施。這些設施可以防止意外外釋和減少設施環境中的直接輻射，包括消防設施和必要的電力供應系統。
- K. 消防評估包括對建築、設備技術和防禦性消防措施的評估。
- L. 對停止運轉後的運營和設施拆除的營運規定以及行政組織規定、相關品質安全措施和管理體系進行審查，以確保其符合相關法規要求，並適用於停止運轉的運營和拆除作業。

3.4.2 設施拆除審查結果

(1) 拆除方案

A. 反應器壓力槽及內部組件、圍阻體拆除概要

a. 概要

預計在第 1 階段拆除部分：反應器壓力槽頂蓋、反應器壓力槽內部組件(蒸汽乾燥器、汽水分離器、中子通量測量探管及爐心支撐結構等結構)、圍阻體部分結構(圍阻體上蓋、帶有閘門的管道系統、支架、固定裝置、平台等結構)及冷凝室頂板與外壁。前置準備工作預計拆除不再需要的工具與裝置，同時用過燃料池中儲存格架也將拆除。另外，將對圍阻體與反應器壓力槽間的通道進行改裝，並拆除不再需要的設備組件。相關所有拆除或改裝作業實施前都須證明其拆除或改裝技術的可行性。

拆解技術為機械和熱切割方式。另外依所採用的方法，將對應的工作區域進行封閉，必要時應使用空氣過濾系統。反應器壓力槽內部組件將在靠近反應器的沉澱池與儲存池中進行拆解。為進行這些作業，將安裝新的設備，如機械和熱切割技術設備、搬運設備、

過濾系統與清潔系統、通風與監測系統。用來拆解的容器可以使待拆組件和切割設備都容納其中，優點為切割作業所產生的切屑與池水分離並便於過濾。拆解設備的控制台設置在工作區和拆解區附近，搭配設置屏蔽和移動式過濾系統。使用適當技術防護結構，在必要範圍內保護池底和水位補償器免受重物墜落影響。

b. 評估標準

- i. 應描述除役措施和程序(包括：拆除步驟和措施、待拆組件相互間關係和預計時間順序及拆解技術和除污技術)，並證明所申請的措施不會對後續拆除造成困難。
- ii. 拆除規劃應將安全執行工作、避免放射性物質外洩的安全處理，以及將操作人員和周圍環境的輻射曝露降至合理可達到的最低程度。

c. 評估結果

- i. 拆除工作的預期順序，首先是為設置拆解場地創造施工空間，然後是拆除「可使用現有空間設備拆除的反應器壓力槽內部組件」，最後是拆除需要新建起重設備才能處理的組件。
- ii. 拆解區域的設施，包括基礎結構、用來拆解的容器、切割設備、工作平台和控制裝置，經評估可整體上適合安全執行拆解作業。
- iii. 拆解工具與分解方法，由於使用磨料水刀切割技術、電弧切割等切割技術在其他核電廠拆除反應器壓力槽等系統組件具有豐富經驗，經評估沒有任何顧慮。
- iv. 包裝站的設置與運輸設備經評估是符合輻射防護與廢棄物處理程序、搬運的要求。

B. 反應器廠房內拆除概要

a. 概要

拆除工作開始時，首先應為拆除反應器壓力槽內部組件和圍阻體創造空間，為此，應將反應器壓力槽連接的管道分離並封閉。管道與設備組件的拆除工作應按房間進行，並根據工作進度調整拆除區域的基礎系統，具體的拆除程序應該詳細規劃。

現場拆除組件和設備組件將其運走，應在特定地點進行進一步拆解。如果無法立即運輸，則將拆除的設備組件暫存。或者，也可以先在現場拆解設備，然後再進行運輸。運輸應使用現有的起重設備和運輸工具。

停用系統的拆除前須滿足以下條件：

- i. 系統功能已完全喪失
- ii. 該系統對於後續拆除作業已沒有需求，又或有替代方案
- iii. 已確認不會對仍需使用的系統產生不良影響，並符合防止放射性物質外釋的原則。
- iv. 在拆除順序方面，應考慮輻射防護因素，如應先清除熱點，然後拆除污染程度較低的系統，以避免交叉污染，並採用逐室拆除和明確標記的方法。
- v. 拆除順序不應使後續拆除工作變得困難或無法進行。一般而言，反應器廠房內、反應器周圍、反應器壓力槽內部等拆除作業應該相互協調。

b. 評估標準

- i. 必須描述拆除設施的預期步驟與措施，包括預計的順序、必要的基礎設施供應、運輸路線、處理設施與場地等。

- ii. 應描述停止運轉措施和程序，證明不會對後續的拆除造成困難。

c. 評估結果

- i. 當設備組件或不在需要的系統，或者有適當的替代措施時，即可進行拆除。拆除條件包括停用、設置運輸通道和安裝開口。拆除工作必須在不影響仍需使用的基礎系統與避免放射性物質外洩的前提下進行。拆除前必須證明設備組件拆除後沒有安全疑慮。經審核後都符合以上原則。
- ii. 規劃的合理拆除順序，也表明該流程可確保不會增加後續拆除工作困難，經審核確認符合要求。

(2) 拆除程序

A. 概要

所有拆除程序都須通過核能主管機關許可，並且僅允許已經停用的系統和組件設備的拆除程序。拆除作業前須符合：

- a. 系統拆除前需卸除壓力、排空。
- b. 中斷欲拆除系統與仍須運轉系統的連接，並確保對仍須運轉系統沒有影響。
- c. 在管制區進行拆除作業時，應完成輻射特性分析，並確認廢棄物處理途徑。
- d. 若涉及消防或結構安全變更則須依規定申請變更及變更審查後，才可進行拆除程序。
- e. 完成拆除作業後，須更新相關文件資料。

B. 評估標準

核電廠的停止運轉和拆除受原子能法的規定約束外，也受核能監管

機構的監管。根據原子能法第 7 條第 3 款，監管機構有責任實施監管，以證明符合許可證中的邊界條件和要求，並可徵詢專家的意見。

C. 評估結果

關於拆除通知內容的規定，使所有相關的安全技術方面都能及時得到審查。特別是，作為提交拆除通知的前提條件，必須提供有關前期停止運轉程序和前期修改申請的資料。關於輻射防護措施、拆除和除污技術的選擇等資料，對是否符合保護目標(防止放射性物質外洩)進行評估。根據特性、材料類型、質量和預定的處置途徑，可以評估拆除的物流。以上審查符合評估標準的要求。

(3) 拆解設備與切割技術

A. 概要

針對各種拆解技術與設備選擇標準：人員輻射防護、放射性物質管制、作業安全、遠端可操作性、水下可用性、效率、廢棄物產量、空間需求、運送需求、待拆解材料特性、選用設備可能的磨損等選擇標準。實際採用技術仍會詳細規劃評估，採用原則為使用經過驗證切割方法，且使用設備技術時，應考慮到操作簡單，設備使用後可便於除污。人員防護部分採用屏蔽、人員防護服、呼吸防護具等輻防措施，以減少人員的輻射曝露，避免放射性污染擴散，並制定輻射防護措施時，應考慮現有放射性核種狀況。

拆解技術分為「機械拆解」和「熱拆解」：

- a. 機械拆解(切割)：鋸切、銑削、鑽削、剪切、WASS 水磨料切割、破碎、鑿削等技術。
- b. 熱拆解(切割)：氣體切割、等離子切割、電弧金屬切割、放電加工等技術。

與機械拆解技術相比，熱拆解技術缺點為切割作業過程中會產生更多放射性空浮物質，而優點為可更快切割待切物。因此拆解程序規劃，為減少放射性空浮物質外釋，計畫為拆解受污染的設備組件的拆解現場須配備工作帳篷或鋁板阻隔裝置，及配有空氣過濾設備。

B. 評估標準

在許可程序中，必須描述預計採用的除役和拆除技術，包括拆解技術、遠程操作的拆除技術、除污程序以及必要的輔助設備。除污之目的係要降低作業人員輻射曝露，且過程中要盡可能減少產生的二次廢棄物量。

C. 評估結果：

- a. 所提設備技術選擇標準合理，優先考慮人員防護，其次才是技術方面考量。其他措施主要涉及個人防護裝備、屏蔽裝置以及各種形式的空氣過濾設備和隔離裝置。
- b. 使用已經驗證的成熟技術，包括基本的可操作性及廢棄物產量都有相關實例驗證。
- c. 新設備的製造、測試與使用應按照設備技術規範要求，並經核准。依據設備技術規範要求，應描述新使用設備技術的品質保證措施，包括拆解和操作技術以及相關的輔助系統。設備技術規範可確保使用流程的安全性。
- d. 新設備將進行測試運轉、相關設備運轉故障處理計畫、透過水下攝影機進行工作監控及特殊輻射防護措施。
- e. 結論，確認可證明其安全用於拆除核電廠反應器壓力槽及內部組件拆解。

(4) 除污程序

A. 除污作業目的為降低人員輻射曝露、防止污染擴散、材料除污後利用或外釋。應在廠房以及管制區域內現有的其他合適地點安裝除污設備。除污主要應在廠房內進行，但也可以由合格的服務提供商在廠區外進行。

除污程序應根據以下標準在個別情況下進行：

- a. 工作安全
- b. 人員的輻射曝露
- c. 除污效率
- d. 除污設備操作穩定性
- e. 二次廢棄物產量
- f. 空間需求
- g. 物流和運輸要求
- h. 經濟性
- i. 污染程度與類型
- j. 除污標準

應採用機械方法，例如擦拭、刷洗、銑削、高壓清洗、噴砂等方法，以及化學方法，例如使用酸、螯合劑和溶劑，並可輔以電拋光、熔融和超聲波等方法。

B. 評估標準

證明已降低人員的輻射曝露並防止污染傳播。要求優先通過現有廠房空間和技術手段或適當的工作程序確保對外部和內部輻射曝露的防護。

C. 評估結果

通過各種預定且符合上述選擇標準的除污程序，可以實現減少放射

性廢棄物。

3.4.3 輻射防護審查結果

(1) 潛在放射性物質處理的危害

A. 概要

補充申請現有許可證涵蓋之外的放射性物質處理，用於設施的基礎系統與拆除。透過規劃和實施拆除活動、基礎設施的持續運作達到，達到「避免放射性物質外洩」和「避免不必要的輻射曝露」的目的，並限制操作人員和民眾的輻射曝露。由於已無燃料棒因此無須針對次臨界及用過燃料冷卻等因素考慮潛在放射性物質處理的危害。

B. 評估標準

審查申請處理的放射性物質是否涵蓋了該設施中的放射性物質。

C. 評估結果

放射性物質處理方式涵蓋了計劃中的基礎系統和設施拆除作業，該設施中的所有放射性物質都涵蓋在內。所需的基礎系統與拆除規劃須根據輻射特性分析進行規劃。以上經評估符合停止運轉指南要求。

(2) 工作場所監測與輻射防護措施

A. 概要

為限制工作人員的輻射曝露，應採取以下措施：

- a. 對設備組件和工作區域進行除污
- b. 部分管制區免遭未經許可的進入

- c. 標示高劑量區域
- d. 在貯放和緩衝存放區域使用屏蔽裝置
- e. 設置圍欄或移動式輻射防護帳篷，並配備移動式過濾裝置
- f. 保障工作場所的安全，並提供個人防護裝備
- g. 採取適當的防護措施，避免人員受到污染
- h. 優化拆解過程的時間安排
- i. 設置污染區
- j. 遠程操作和控制

在選擇拆解、除污、處理技術時，應考慮人員輻射曝露及放射性物質污染狀況，即便發生故障時，也能符合人員劑量限值規定。拆除過程中，固定式輻射監測器主要安裝在反應器壓力槽附近，其餘將視拆除進程減少安裝，而其他工作地點將使用移動式測量儀器進行監測，以保護人員的安全。在進入輻射劑量率變化較大的地點之前，應先確認現場輻射劑量率現況。管制區出口對於人員污染監控部分應保持不變。管制區內與監測區內的污染監控應按照既定的計畫進行量測。

B. 評估標準

有義務避免對人體和環境造成任何不必要的輻射曝露或污染，並在遵守科學和技術的原則下，考慮到每個案例的所有情況，將任何輻射曝露或污染控制在最低限度。在降低輻射劑量方面，應優先透過現有廠房空間、技術裝置和適當程序來確保外部和內部的輻射曝露防護。

C. 評估結果

通過對設備組件和工作區域進行預定的除污處理，可以降低輻

射劑量率，從而能夠在更有利的輻射條件下工作。在規劃和執行受管制區域內的作業時，應讓「監測」輻射防護負責人參與其中，以便根據設施的實際狀況制定輻射防護規定。管制區內輻射劑量率應透過輻射防護人員定期巡查方式監測。管制區出口應執行人員污染量測。以上經評估符合輻射防護條例規定，有關污染測量規定與污染發生時應採取的措施應明確定義，以明確規定污染監測的責任歸屬。

(3) 輻射防護管制

A. 概要

管制區工作的輻射工作人員將配備官方和企業直讀式的劑量計(電子式劑量計)。因為可能出現攝入情況，對於所有輻射工作人員執行定期監測，如果懷疑可能出現攝入情況，立即安排攝入測量或排泄分析。人員監控文件包括進入管制區的相關數據外、劑量監測結果(官方劑量結果)、體檢時間與結果、開始監控的時間點與特殊事件(如人員污染)。

B. 評估標準

個人劑量監測結果紀錄。

C. 評估結果

依輻射防護條例第 41 條規定須使用官方劑量計、可立即讀取的電子式劑量計以及個別情況下的局部身體劑量計來測量人體劑量，另外制定低於法定限值的行政管制值，是為確保符合法定限值的適當手段。所有輻射工作人員都應定期接受攝入監測(體內污染監測)。以上經評估人員輻射防護監測部分符合輻射防護條例規定。

(4) 輻射防護在工作流程中的參與

A. 概要

維護和拆除條例的主要目標是盡可能降低個人劑量及從事維護和拆除工作的人數，包括像是維護、改裝、定期檢查、故障排除、停機、拆除、除污、取樣及為拆除或處理放射性廢棄物準備工作等，皆為可能存在高輻射曝露風險作業。為對於改裝措施及拆除作業，必須評估作業預計造成的個人和集體劑量，並檢查必要輻射防護措施。如果預計改裝或拆除計畫中會出現不利的輻射條件，應制定特定的輻射防護工作流程計畫。拆除設施時應採取必要的輻射防護措施，如屏蔽、隔離帳和個人防護裝具。規劃輻射防護措施時，應將拆除作業中產生的放射性物質與拆除區域放射性廢棄物處理納入考慮。只有在實施了必要的預先安全措施並在現場進行了檢查後，才能獲得許可進行工作。工作中斷或恢復應向輻防組織通報。規劃放射性廢棄物處理作業時，輻防人員應將監測作業納入規劃。

B. 評估標準

所有停用的許可程序都必須考慮到輻射防護要求，並在重要的項目中詳細規定作業流程。涉及高劑量率作業，須要作業前的評估與作業中的監控，並記錄作業內容與人員劑量。

C. 評估結果

輻射特性分析所得數據應用於輻射防護，是規劃拆除和拆解活動的基礎。維護以及預計會出現高輻射劑量率的拆除作業中，應制定輻射防護工作程序。經審查制定輻射防護工作流程計畫符合要求。

3.4.4 放射性廢棄物處理審查結果

對於放射性廢棄物處理方案審查：

A. 概要

安全報告中描述如何處理產生的廢棄物，廢棄物分類如下：

- a. 殘存低微放射性的廢棄物(可根據規再進行利用或回收)。
- b. 放射性廢棄物(無法外釋或供再利用的廢棄物，必須符合臨時貯存和最終處置的要求處理)。
- c. 非放射性的物質(未受到污染或活化，應該外釋)

B. 評估標準

根據除役指南規定，在拆除設施前，必須提交一份總體方案，內容包括：

- a. 描述和分類產生的殘存放射性的廢棄物。
 - b. 放射性廢棄物管理。
 - c. 物質外釋程序。
 - d. 土地和建物外釋或交還方案。
 - e. 廢棄物流向，包括必要的特定運輸和倉儲物流及其相互關係。
- 根據廢棄物管制規定，廢棄物處理方案應說明應包含所有類型的殘存放射性的廢棄物，包括收集和記錄措施，以及預定的再利用途徑。對於放射性廢棄物，應說明處理措施。

C. 評估結果

對於殘存放射性的廢棄物、放射性廢棄物、非放射性物質的分類、再處理、外釋及廢棄物流向紀錄等程序，經整體綜合評估是符合相關規定。

3.4.5 事件評估審查結果

(1) 現狀與潛在風險

A. 概要

潛在風險事故分類成內部影響事件、安全技術重要設施故障、外部影響事件及與廠區其他設施的相互作用。而停止運轉後 KKB 設施的輻射狀況如下：

- a. 自 2007 年 7 月以來，未再產生新的放射性物質。
- b. 短半衰期的放射性物質，尤其是放射性碘同位素和惰性氣體已經衰變。
- c. 該設施中已無任何燃料。
- d. 可能仍然存在的破損燃料棒，每根燃料棒的發熱量極低，約為 5 瓦，不再需要主動冷卻。
- e. 該設施處於停止運轉狀態。

預計拆除開始時，放射性物質主要存在於反應器壓力槽及內部組件中。只有一小部分放射性物質以污染形式存在，主要位於裝置組件的內部表面。對於事件分析而言，這意味著絕大部分放射性物質都結合在金屬中，在剩餘運轉期間不會因假設事件而外釋出來。

B. 評估標準

關於事件發生時可能外釋的放射性物質的數量和組成，審查設備的具體情況並評估輻射可能狀態。

C. 評估結果

提交的事件分析假設該設施已無燃料，且活化物主要來自於反應器壓力槽內部組件中，只有小部分放射性物質以污染物方式

存在設備組件表面，在發生事故時可能被排出。排出的放射性物質可通過系統除污進一步減少。在考慮到設備的具體情況後，事件分析以全面描述可能事件。

(2) 分析的事件

A. 概要

- a. 反應器壓力槽內部組件和壓力槽拆解、分解和包裝過程中的吊運墜落、管制區內運輸大型單一組件時發生墜落情況或其他墜落情況。
- b. 安全技術重要設備的故障和影響。
- c. 各類可能的火災類型。

B. 評估標準

根據核能安全條例第 117 條第 16 款/K-1 21 規定，事故輻射暴露量應不能超過 50mSv 的有效劑量。

C. 評估結果

根據分析結果，評估關於各類型墜落情況、安全技術重要設備的故障或是各種可能火災類型，證明符合不超過有效劑量 50mSv 的事故限制值。

3.5 KKB 反應器壓力槽拆解現況

布倫斯比特爾核電廠(KKB)在除役拆除作業中，反應器壓力槽(RPV)中內部組件是最先被移除拆解。

(1) 反應器壓力槽頂蓋

反應器壓力槽 (Reaktordruckbehälters, RDB) 的頂蓋重達近 70 公噸，直徑超過 6 公尺。頂蓋圓頂由厚度 8 公分的耐熱鋼製成，內側為

防腐蝕覆有 6 毫米厚的不銹鋼鍍層。法蘭部分的壁厚達到 42 公分。頂蓋規劃切割成八個分段，每段重達 2.8 噸。從環形法蘭上則切割出六個部分，每個重 7.7 噸，如圖 3.24。切割過程中使用於支撐各圓頂分段的下部支撐平台及鋼製索鋸皆為特製品。切割作業由工作人員遙控鋼製索鋸進行，如圖 3.25。拆解後的上蓋組件共裝入四個 20 英尺的 IP2 貨櫃中，如圖 3.26。這些切割件將送往合作廠商進行鋼材熔煉。熔煉後的鋼材可再用於其他用途。

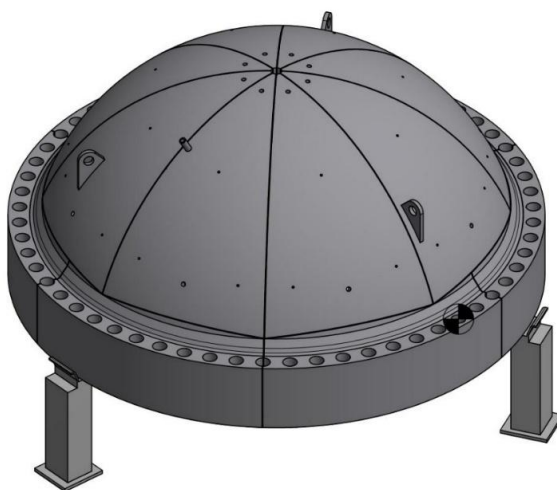


圖 3.24：反應器壓力槽頂蓋切割規劃示意圖

(資料來源：

<https://perspektive-brunsbuettel.de/2024/12/27/deckel-des-reaktordruckbehalters-zerlegt-und-verpackt/>)



圖 3.25：工作人員切割反應器壓力槽頂蓋

(資料來源：

<https://perspektive-brunsbuettel.de/2024/12/27/deckel-des-reaktordruckbehalters-zerlegt-und-verpackt/>)

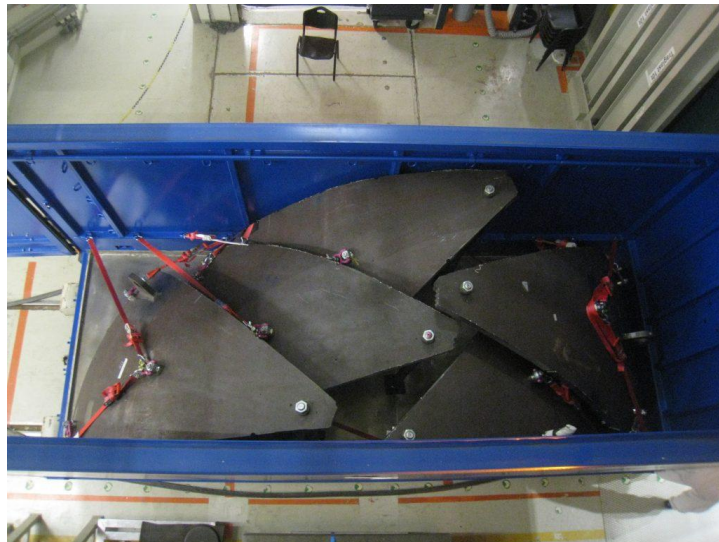


圖 3.26：切割件裝入 IP2 貨櫃待後續熔煉作業

(資料來源：

<https://perspektive-brunsbuettel.de/2024/12/27/deckel-des-reaktordruckbehalters-zerlegt-und-verpackt/>)

-verpackt/)

(2) 蒸汽乾燥器

蒸汽乾燥器於 2019 年 8 月底由反應器壓力槽中被吊出後，被放置於反應器上方水封沉澱池進行拆解作業。該切割採用水下切割機器人 AZURo (Automatische Zerlegung von RDB-Einbauten mittels Unterwasser-Robotertechnik, 即「利用水下機器人技術自動拆解反應器壓力槽內部組件」)，如圖 3.27，其原理採用高壓水流結合磨料。完成切割後的切割件會放置於符合最終處置貯存要求容器 (Konrad-Container)，如圖 3.28。水下切割機器人拆解蒸汽乾燥器時，現場也同步進行汽水分離器分離作業，並使用水平鋸進行拆解，如圖 3.29。

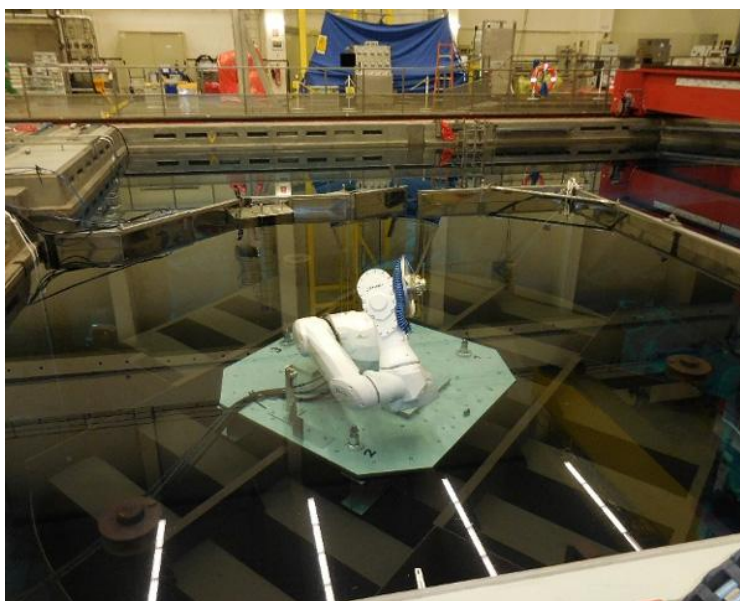


圖 3.27：水下切割機器人 AZURo

(資料來源：

<https://perspektive-brunsbuettel.de/2020/07/21/azuro-macht-pause-dampftrockner-im-kernkraftwerk-brunsbuettel-erfolgreich-zerlegt/>)

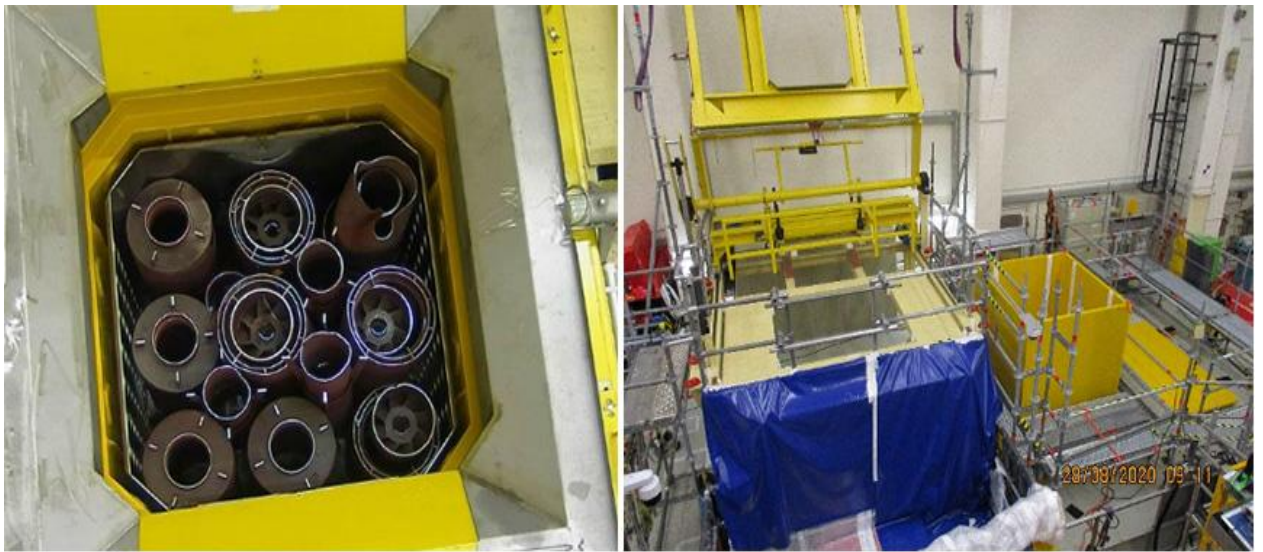


圖 3.28：Konrad-Container

(資料來源：

<https://perspektive-brunsbuettel.de/2021/06/28/abbau-kkb-weitere-grosskomponente-erfolgreich-zerlegt/>)

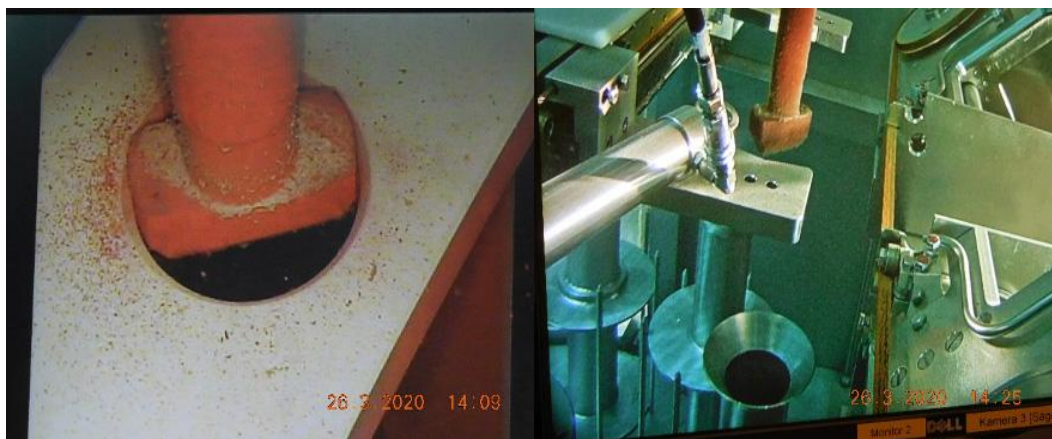


圖 3.29：使用水平鋸拆解錘頭螺栓(用於固定汽水分離器)

(圖片來源：

<https://perspektive-brunsbuettel.de/2021/06/28/abbau-kkb-weitere-grosskomponente-erfolgreich-zerlegt/>)

(3) 汽水分離器

汽水分離器與蒸汽乾燥器相同，從反應器壓力槽吊出後，於「沉澱池 (Absetzbecken)」中進行水下拆解作業。使用多種規格的往復鋸、帶鋸與圓鋸進行切割作業，如圖 3.30。

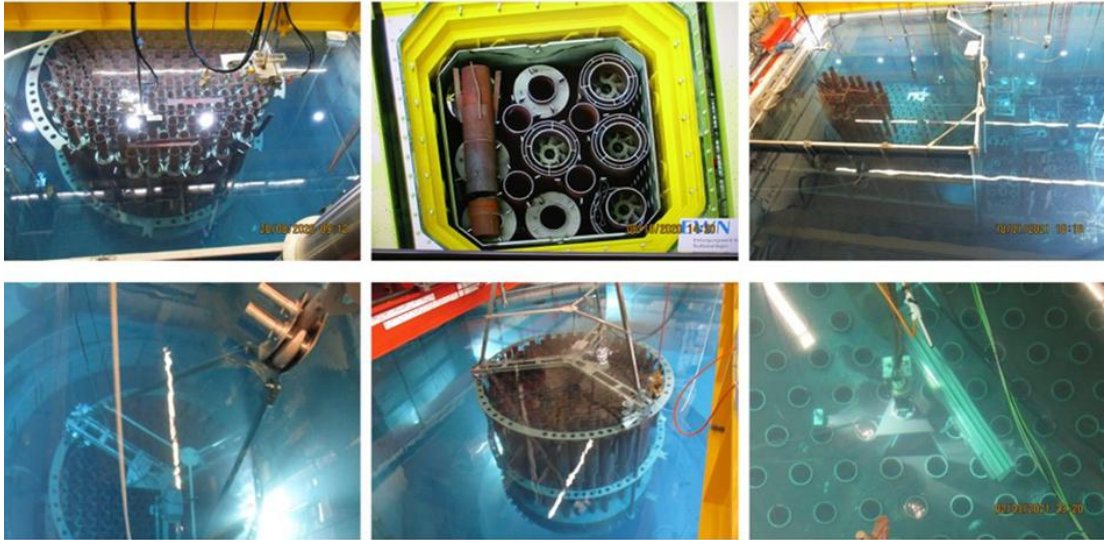


圖 3.30：汽水分離器吊離反應壓力槽與後續於沉澱池進行切割作業

(圖片來源：

<https://perspektive-brunsbuettel.de/2021/06/28/abbau-kkb-weitere-grosskomponente-erfolgreich-zerlegt/>)

(4) 中子通量測量探管

38 支中子通量測量探管 (Neutronenflussmesslanze, NFML) 成功完成拆解。這些中子通量測量探管用於在運轉期間測量中子通量。探管上裝有多層不同高度的探測器，能夠提供反應器各運轉狀態下的中子通量資訊。首先，直徑約 31 毫米、長度超過 15 公尺的探管需被分割成可包裝的短管，共進行了近 400 次切割，如圖 3.31。作業採用水下液壓剪，剪切設備安裝在上部爐心支撐格架上。探管從其原本位置拉

出，並從下端開始逐段剪斷。所有作業均在水下進行，並確保至少有 2.8 公尺的水層覆蓋以提供輻射遮蔽。



圖 3.31：利用水下液壓剪將中子通量測量探管拆解

(圖片來源：

<https://perspektive-brunsbuettel.de/2021/06/28/abbau-kkb-weitere-grosskomponente-erfolgreich-zerlegt/>)

KKB 拆除反應器壓力槽內部組件拆解所累積的經驗回饋，拆解反應器壓力槽內部組件所使用的鋸機大多進行一定程度改裝，操作人員必須累積操作經驗，使用過程中驅動元件、鋸片何時需要進行更換，以及遇到原本規劃的設備不符合預期必須更換時的設備時，重新改裝設備與操作人員熟悉新設備所需時間。另外，所有切割作業都存在一個關鍵性問題就是工作區域清潔問題。所有使用鋸切操作都會產生切屑，這些切屑都必須從水中清除並妥善處理。

3.6 管制建議

參考國際核電廠實務拆除經驗與德國 KKB 核電廠除役與拆除安全報告及許可報告等內容，彙整出反應器壓力槽拆除管制建議，供管制單位

參考。

●有關反應器壓力槽拆除作業管制建議如下：

- (1) 審查反應器壓力槽拆解計畫，是否詳細規劃並考量包括準備工作(如基本系統的維持、場地作業空間規劃等)、待拆物的輻射特性、拆解技術及作業是否搭配遠端作業模式等因素。
- (2) 應描述反應器壓力槽拆除程序(包括：輻射特性分析、拆除步驟和措施、待拆組件相互間關係和預計時間順序及拆解技術和除污技術、必要的基礎設施供應、運輸路線規劃、處理設施與場地整理等)，並證明拆解措施不會對後續拆除造成困難(包括作業人員、民眾、環境保護)。
- (3) 停用基礎系統應提出備用方案且不會對後續拆除作業造成影響，如果有涉及消防或結構安全變更等安全性質變更作業，則應提出申請變更，變更審查許可後才可進行作業。另外，依照輻射安全要求，重要的工作項目應要求有詳細工作流程，規劃相對應之輻射防護措施。
- (4) 對於規劃除污區、使用輻射屏蔽、建立低輻射等候區、使用隔間阻隔及移動式過濾系統(降低空浮擴散)，以降低工作人員整體輻射劑量。
- (5) 對於濕式切割所需水質過濾系統，應審查相關設備發生故障時之處理方案，及人員維修作業輻射劑量評估。
- (6) 反應器壓力槽拆解計畫申請許可時，必須描述預計採用的除役和拆除技術，包括拆解技術、遠程操作的拆除技術、除污程序以及必要的輔助設備。除污之目的係要降低作業人員輻射曝露，且過程中要盡可能減少產生的二次廢棄物量。另外，對於拆解作業過程中可能

發生的拆解機具重大故障維修，應有詳細規劃應對方案，避免作業人接受大量輻射劑量。針對拆解機具設備，應有完整的操作訓練計畫，確保作業人員對於設備操作的熟悉度。

- (7)對於切割技術/機具投入實際作業前，應執行冷測試運轉，並於實際作業前盡可能排除相關冷測試運轉所遭遇到的問題，避免後續產生問題時，人員維修上所遭遇的輻射曝露超過評估值等問題。
- (8)審查拆除規劃應檢查其拆除工作規劃是否符合安全(工安及輻安)、放射性廢棄物是否有妥善規劃，以確保可以合理抑低作業人員和周圍環境的輻射曝露。包括對於無法直接運離廠區之裝有廢棄物的容器應規劃適當位置暫放，並規劃輻防管制措施。
- (9)對於反應器壓力槽拆解過程所可能產生的二次廢棄物亦應加以評估其可能產生量。
- (10)對於廢棄物切割塊尺寸大小，應考慮廢棄物容器尺寸及廠房吊運設備的荷重能力，明確規劃於計畫中。
- (11)對於高劑量率的組件拆解作業，應審查是否規劃對應之輻射防護作為及透過視察作業，檢查是否落實執行相關輻射防護措施。
- (12)可能發生的意外事件，如反應器壓力槽切割塊等重物吊運、熱切割引發的火災等，應要求有相對應之緊急應變計畫，並評估可能的影響，包括輻射評估。

最後管制單位對於核電廠反應器壓力槽拆除的管制作業，可先審查電廠提出之拆解計畫是否合理可執行，並且有無針對拆除設備進行冷測試等進行反應器壓力槽拆除前的準備工作。後續拆解作業管制視察可確認核電廠是否依拆解計畫內容進行。以上建議供主管機關參考。

4. 結論

本計畫第一、二子計畫研究探討結論說明如下：

(1) 國際核能電廠除役管制文件及工程管理案例研析

核一廠的除役工作將進入周邊設施、反應器及建物拆除作業等除役拆廠階段，所以參考研析國際上已有經驗的他國管制單位實際案例，將可提供我國管制機關在核電廠除役工作各階段的視察與管制之重要參考。本報告從日本除役作業在整個生命周期進行研析，從除役計畫的法令依據、申請主要文件、除役作業各階段劃分、工程管理、作業安全管理、人員進出管制到廢棄物處理，彙整其要點。最後並考量我國核設施除役作業現況，提出相關建議，以供主管機關在未來進行拆除作業審查、視察、督導、管制之參考。

(2) 國際核電廠除役拆除作業關鍵要項管制技術實例研究

參考國際間核電廠反應器壓力槽實際拆除經驗及管制審查作法，對於我國管制機關未來視察與管制監督尤為重要，特別是由於反應器壓力槽及其內部組件作為核電廠廠區中具有最高輻射劑量率的大型組件，在拆解過程中所面臨的輻射安全需要特別注意，以確保設施、工作人員、民眾與環境安全。

反應器壓力槽及其內部組件在拆解前須要詳細規劃拆解計畫。本報告蒐集及研析美國、西班牙反應器壓力槽拆除案例經驗，包括拆解技術時應考量注意事項、作業現場準備、廢棄物運輸動線規劃、現場輻防管制等資訊，並研析德國 KKB 核電廠除役及拆除安全報告與許可安全評估報告，瞭解國際上對於反應器壓力槽拆除實務經驗，最後彙整成相關

建議，作為國際實務案例經驗回饋，供未來主管機關審查拆除作業時參考。

参考文献

- [1]原子力文化財團，“原子力安全規制の体制変更”，
<https://www.ene100.jp/zumen/5-2-6>, 2016.
- [2]原子力規制委員会，“組織図”，
https://www.nra.go.jp/nra/gaiyou/nra_chart.html.
- [3]日本原子力産業協会，“日本の原子力発電炉（運転中、建設中、計画
中など）”，
https://www.jaif.or.jp/cms_admin/wp-content/uploads/2025/09/jp-npps-operation20250908.pdf, 2025.
- [4]原子力規制委員会，“核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律”，2025.
- [5]原子力規制委員会，“実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則”，
2025.
- [6]原子力規制委員会，“発電用原子炉施設及び試験研究用等原子炉施設の
廃止措置計画の審査基準”，2025.
- [7]国際原子能総署（IAEA）SSG-47，“Decommissioning of Nuclear Power
Plants, Research Reactors and Other Nuclear Fuel Cycle Facilities”，2018.
- [8]関西電力公司，“廃止措置”，
https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/anzenkakuho/haishi.html.
- [9]日本原子力発電株式会社，“廃止措置工事のスケジュール”，
<https://www.japc.co.jp/tokai/haishi/construction.html>, 2023.
- [10]原子力規制委員会，<https://www.nra.go.jp/data/000332678.pdf>

- [11] 中部電力公司，“濱岡原子力発電所1号機および2号機の廃止措置計画の変更認可申請概要”，2024.
- [12] 原子力文化財團，“廃棄物の区分”，<https://www.ene100.jp/zumen/8-1-1>, 2016.
- [13] 中部電力公司，
https://www.chuden.co.jp/energy/nuclear/hamaoka/hama_haishi/kaitai/
- [14] 台湾電力公司網站，
<https://service.taipower.com.tw/nbmi/decommission/14/>
- [15] Connecticut yankee decommissioning experience report detail experiences 1996-2006, 2006.
- [16] Decommissioning : Reactor Pressure Vessel Internals Segmentation, 2001.
- [17] <https://www.orano.group/usa/en/our-portfolio-expertise/products-services/decommissioning-services/vermont-yankee-decommissioning>
- [18] Feedback From José Cabrera Plant Decommissioning Project, WM2014 Conference.
- [19] Stilllegung und Abbau Kernkraftwerk Brunsbüttel Sicherheitsbericht, 2015.
- [20] Sicherheitsgutachten für die Genehmigung zur Stilllegung und zum Abbau des Kernkraftwerkes Brunsbüttel, 2018.