

國家原子能科技研究院
委託研究計畫研究期末報告

日本長期停機(含除役)核設施用過燃料池運轉維護及安全管理技術

實例研究

**Study on Safety Regulation of Spent Fuel Pool Operation and
Maintenance for Nuclear Facilities during Decommissioning in
Japan**

計畫編號：112B014

受委託機關(構)：國立清華大學

計畫主持人：許文勝

研究期程：中華民國 112 年 5 月至 112 年 12 月

研究經費：新臺幣 85 萬元

國原院聯絡人員：林國楨

報告日期：112 年 12 月 4 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
英文摘要	2
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、 資料研讀	5
三、 成果彙整	5
參、 日本核電廠除役期間用過核燃料管理及用過燃料池的運轉 維護	6
一、 前言	6
二、 核燃料貯存、移出及轉讓之實例探討	7
(一) 島根核電廠的概要	7
(二) 島根 1 號機的除役時程	10
(三) 核燃料的貯存狀況	11
(四) 核燃料的管理	13
(五) 核燃料的移出及轉讓	14
(六) 用過核燃料的貯存期長	16
(七) 除役期間反應器設施的維護管理	17

(八) 除役期間用過燃料池的維護管理	18
(九) 除役期間應維持其功能、性能的設備及期間	19
(十) 用過燃料池水位及水溫標準	39
(十一) 用過核燃料貯存安全規定.....	40
(十二) 除役期間用過燃料池的安全對策.....	40
(十三) 用過核燃料冷卻水喪失時的燃料完整性評估	41
肆、 管制關鍵要項	47
伍、 參考文獻	49

圖 目 錄

圖 3- 1	核電廠除役整體流程[6].....	6
圖 3- 2	核電廠除役後輻射風險變化示意圖	7
圖 3- 3	中國電力島根核電廠座落位置示意圖	8
圖 3- 4	中國電力島根核電廠空拍圖	8
圖 3- 5	島根 1 號機的用過燃料池	17
圖 3- 6	除役期間用過燃料池需維護管理功能[6].....	18
圖 3- 7	用過燃料池內燃料束掉落事故評估[7].....	39
圖 3- 8	除役期間用過燃料池的安全對策[6].....	41
圖 3- 9	用過核燃料冷卻水喪失時的燃料完整性評估[6]	42
圖 3- 10	用過核燃料完整性的評估方法[4].....	43

表 目 錄

表 3- 1	島根 1 號機的運轉履歷[6].....	9
表 3- 2	除役整體工程規劃[14].....	10
表 3- 3	核燃料的貯存狀況[1].....	12
表 3- 4	核燃料的移出及轉讓方式[6].....	15
表 3- 5	廠房及結構物[17].....	22
表 3- 6	核燃料吊運設施[17].....	24
表 3- 7	核燃料貯存設施[17].....	27
表 3- 8	放射性廢棄物的處理設施[17].....	30
表 3- 9	輻射管理設施[17].....	35
表 3- 10	通風設備[17].....	37
表 3- 11	緊急電源設備[17].....	38
表 3- 12	其他安全確保所需設備[17].....	39
表 3- 13	除役期間與運轉時的功能差異比較[3].....	40
表 3- 14	用過燃料池水位及水溫標準[8].....	39
表 3- 15	用過燃料池水位及水溫未符合標準時應採取的措施[8]	40
表 3- 16	用以防止反應器廠房氫氣爆炸的嚴重事故因應設備[12]	45

中文摘要

標題：日本長期停機(含除役)核設施用過燃料池運轉維護及安全管制技術實例研究

計畫編號：112B014

計畫參與人員：許文勝、楊雋之

所屬單位：清華大學

核電廠除役為一項龐大且複雜的拆除工程，依法規需於 25 年內完成。國內核一廠、核二廠共計四部機組雖已進入除役階段，然現況所面臨到的共同課題是用過燃料池貯存空間已滿，反應器爐心內燃料棒無處可去，仍無法從爐心退出之困境。考量爐心內燃料棒尚未移出且用過燃料池中仍放置著數量龐大的用過核燃料，除役核電廠仍有必要比照運轉期間的安全水準，持續維持相關維護管理與作業，以確保除役過渡期間的燃料貯存安全。鄰國日本已進入除役程序的機組達 24 部，其除役實務經驗值得我方參考借鏡。本計畫主要針對國內核電廠除役作業現況，探討日本除役核設施用過燃料池運轉維護及相關管制作為，並綜整研析結果以供管制單位參考，期強化我國用過核燃料安全管制技術。

英文摘要

The decommissioning of nuclear power plants is a huge and complex dismantling project that is required by law to be completed within 25 years. Although a total of four units of the domestic nuclear power plants have entered the decommissioning stage, the common problem faced by the current situation is that the storage space in the spent fuel pool is full and the fuel rods in the reactor cores have nowhere to go and still cannot be removed from the cores. Considering that the fuel rods have not been removed from the cores and that there is still a large amount of spent fuel in the spent fuel pool, it is still necessary to maintain the decommissioned nuclear power plants in accordance with the safety level during operation to ensure the safety of fuel storage during the decommissioning transition. Japan, our neighbor, has 24 units in the decommissioning process, and its decommissioning experience is worthy of our reference. This project focuses on the current status of domestic nuclear power plants during decommissioning, investigates the safety regulation of spent fuel pool operation and maintenance for nuclear facilities during decommissioning in Japan. The results of the study are compiled for the reference of the regulatory authorities to strengthen the safety control technology of spent fuel in Taiwan.

壹、計畫緣起與目的

國內核一廠、核二廠共計四部機組雖已進入除役階段，然現況所面臨到的共同課題是用過燃料池貯存空間已滿，反應器爐心內燃料棒無處可去，仍無法從爐心退出之困境。考量爐心內燃料棒尚未移出且用過燃料池中仍放置著數量龐大的用過核燃料，除役核電廠仍有必要比照運轉期間的安全水準，持續維持相關維護管理與作業，以確保除役過渡期間的燃料貯存安全。

為此，國內除役核電廠的作法是於停機過渡階段建立一個具有獨立性的「用過核燃料池島區」，其目的在於重新配置用過燃料池冷卻及淨化系統，以及其他相關支援系統，同時將放射性廢液處理系統功能納入運作，以利於除役作業流程順利進行。為因應除役期間用過燃料池島區的運轉，除了必須進行局部系統設計變更，以排除與既有支援系統的相依性外，同時也有系統新建置與改善、設備新增與修改的需求。由於用過燃料池島區的控制應具有獨立性，故需建置獨立的控制中心，稱為「用過核燃料池島區控制站」，以進行所有必要設備操作與參數監控功能。在所有核燃料移出用過燃料池之前，如何強化用過燃料池島區的功能可說是維持用過核燃料完整性的關鍵。

鄰國日本已進入除役程序的機組達 24 部，其除役實務經驗值得我方參考借鏡。日本除役核電廠雖無另外設置用過燃料池島區的概念，但可參照類似停機過渡階段機組狀態的維護管理作法。本研究主

要針對國內核電廠除役作業現況，探討日本除役核設施用過燃料池運轉維護及相關管制作為，並綜整研析結果以供管制單位參考，期強化我國用過核燃料安全管制技術。

貳、 研究方法與過程

本計畫主要研究方法及步驟說明如下：

一、 資料蒐集

資料蒐集重點以日本除役核設施用過燃料池運轉維護的相關技術報告為主，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。

二、 資料研讀

針對所蒐集到的資料進行研讀與分析。

三、 成果彙整

彙整相關的研究成果，提供給國內管制單位參考，以期有助於強化我國用過核燃料安全管制技術。

參、 日本核電廠除役期間用過核燃料管理及用過燃料池的運轉維護

一、 前言

日本核電廠除役基本方針的首要考量為「確保安全」，並遵循相關法令之規定進行。在除役作業進行期間，必須努力減少輻射曝露劑量及放射性廢棄物產生量，同時確保仍需維持運轉之重要安全功能得以妥善維護管理。除役作業與核電廠運轉時都應在確保安全的前提下進行。

根據「實用發電用原子爐的設置、運轉等相關規則」(以下簡稱「實用爐規則」)第 119 條，日本原子力規制委員會(Nuclear Regulation Authority, 簡稱 NRA) 認可核電廠除役計畫的標準之一為「已從爐心移出用過核燃料」。這項規定確保了日本核電廠在除役初期階段就已將用過核燃料從反應器爐心中移出，因此基本上不會有爐心熔毀等嚴重事故的風險，進而能夠有效降低除役作業期間的潛在風險。

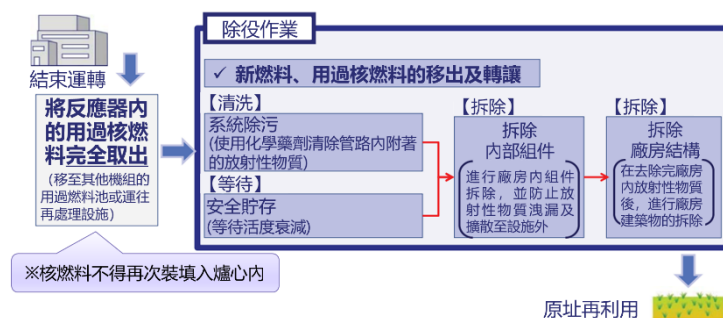


圖 3-1 核電廠除役整體流程[6]

而核電廠在獲得除役認可後，進入除役階段，成為管制機關的安全管制對象。管制機關將根據設施實際的安全狀況，配合除役各階段，採取相對應的分階段管制措施。隨著除役作業的進展，放射性物質將逐步減少。

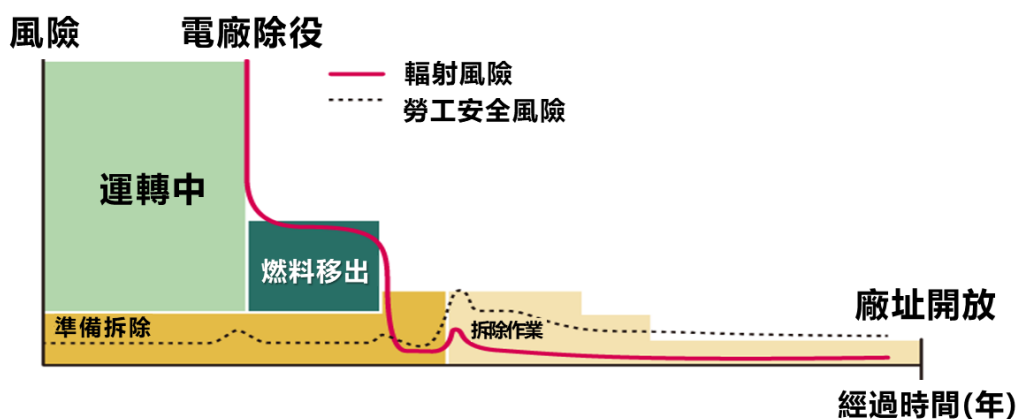


圖 3-2 核電廠除役後輻射風險變化示意圖¹

整個除役作業期間，必須確保對放射性物質的「圍阻」功能，以及對輻射的「屏蔽」功能，以維持除役作業過程中核電廠的安全性。

二、核燃料貯存、移出及轉讓之實例探討

（一）島根核電廠的概要

中國電力島根核電廠位於日本島根縣松江市北部，毗鄰日本海的沿岸地區。該核電廠廠址佔地約 192 萬平

¹ 圖片出處：日本三菱綜合研究所(<https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20201223.html>)。依據 "IAEA, Safety Reports Series No. 77 Safety Assessment for Decommissioning, Annex I, Part A Safety Assessment for Decommissioning of a Nuclear Power Plant" 之資料製成。

方公尺，廠區內共設有三部核電機組。

目前島根核電廠各機組的現況如下：1 號機正在進行除役作業；2 號機正在進行安全對策工程，預定該工程完成後將可重新啟用；3 號機目前仍在建設階段。



圖 3-3 中國電力島根核電廠座落位置示意圖²



圖 3-4 中國電力島根核電廠空拍圖³

(左為 1 號機、中間為 2 號機、右為 3 號機)

² 圖片出處：每日新聞(<https://www.yomiuri.co.jp/national/20220602-OYT1T50071/>)

³ 圖片出處：讀賣新聞(<https://mainichi.jp/articles/20220404/ddl/k32/040/254000c>)

1. 島根 1 號機設備概要

島根 1 號機是日本國產的第一座商用反應器，在經過 41 年運轉歷史後，決定除役。

島根 1 號機為輕水型沸水式反應器(BWR)，在 2015 年 4 月 30 日結束運轉後，於 2016 年 7 月 4 日向原子力規制委員會(NRA)遞交了除役計畫認可申請。經過 NRA 的審核，於 2017 年 4 月 19 日正式獲得除役計畫的認可，並於 2017 年 7 月 28 日開始進行除役作業。

島根 1 號機的運轉履歷，如下表 3-1 所示。

表 3-1 島根 1 號機的運轉履歷[6]

	島根 1 號機
商業運轉日期	1974 年 3 月 29 日
額定輸出功率	460MW
反應器型式	輕水型沸水式反應器(BWR)
用過燃料池容量	1,140 組
用過燃料池貯存量	722 組
結束商轉日期	2015 年 4 月 30 日
除役計畫認可日期	2017 年 4 月 19 日
除役作業開始日期	2017 年 7 月 28 日

(二) 島根 1 號機的除役時程

島根 1 號機的除役計畫規劃時程主要分為四個階段，預計整個作業過程將耗時約 30 年，預定於 2045 年度完成所有除役作業。

根據日本管制機關所預設的除役流程，首要步驟是將用過核燃料取出，接著進行設備組件的除污作業。隨後，根據輻射劑量由低至高的原則，逐一拆除各區域設備。

在整個除役過程中，對於避免輻射曝露以及推進工程進度而言，最為重要的關鍵在於「將用過核燃料移出廠外」。

表 3-2 除役整體工程規劃[15]

除役階段區分		主要作業內容
第一階段 2016~2022 年度 ⁴ (約 7 年)	拆除作業準備階段	- 核燃料移出⁵ - 污染狀況調查 - 系統除污 - 安全貯存 - 輻射管制區外的設

⁴ 第一階段原規劃期程為 6 年後延期至 7 年，因島根核電廠於 2022 年 3 月 29 日向 NRA 提出除役計畫工程變更申報，擬將第二階段開始時程推遲一年。

⁵ 核燃料移出：包括用過核燃料及新燃料。

		備、組件拆除
第二階段 2023~2029 年度 ⁶ (約 7 年)	反應器區域周圍設備 拆除階段	- 核燃料移出 - 安全貯存 - 反應器區域周圍設備拆除
第三階段 2030~2037 年度 (約 8 年)	反應器區域拆除階段	反應器本體拆除
第四階段 2038~2045 年度 (約 8 年)	廠房拆除階段	- 解除輻射管制區 - 廠房拆除作業

(三) 核燃料的貯存狀況

根據 NRA 除役計畫審查標準⁷的規定：反應器設施的除役，必須妥善處理核燃料，以防止核燃料、核燃料污染物或反應器所引起的災害。因此，一旦反應器永久停止運轉，首要步驟即為將用過核燃料從爐心中取出，以降低除役作業的風險。島根 1 號機反應器爐心內的用過

⁶ 第二階段原規劃期程為 8 年後縮短至 7 年，預定於 2023 年度內開始第二階段。

⁷ 「發電用反應器設施及試驗研究用等核設施除役計畫審查標準」2013 年 11 月 27 日原子力規制委員會決定

核燃料已於 2011 年 3 月 21 日全部取出，符合規定要求。

另外，NRA 除役計畫審查標準⁸也要求：在開始除役之前，必須確認核燃料的存在位置、種類及數量。根據管制機關的規定，島根 1 號機在除役之前所進行的調查結果如下：

- 島根 1 號機反應器設施的用過核燃料貯存在 1 號機反應器廠房內的用過核燃料貯存設施（燃料池）。
- 新燃料則貯存在 1 號機反應器廠房內的新燃料貯存庫，以及用過核燃料貯存設施（燃料池）。

關於詳細的貯存數量，可詳見下表 3-3。

表 3-3 核燃料的貯存狀況[1]

貯存位置	種類	貯存量
1 號機反應器廠房內用過核燃料貯存設施 (燃料池)	用過核燃料	722 組
	新燃料	76 組
1 號機反應器廠房內新燃料貯存庫	新燃料	16 組

※ 2016 年 12 月底調查的貯存數量

⁸ 「發電用反應器設施及試驗研究用等核設施除役計畫審查標準」2013 年 11 月 27 日原子力規制委員會決定

(四) 核燃料的管理

1 號機反應器廠房內的用過核燃料貯存設施（燃料池）中的用過核燃料，在轉讓為止之前，將繼續貯存在該廠房內的用過燃料池，或者移至 2 號機反應器廠房內的反應器大樓，暫時貯存於該廠房內的用過燃料池（1 號及 2 號機共用）。

為安全處理及貯存 1 號機反應器廠房內的用過核燃料，將持續維護現有的核燃料吊運及貯存設施，同時維護管理具備燃料處理、防止臨界、冷卻淨化等功能的現有設備。

假若未來將 1 號機反應器廠房內的用過核燃料移至 2 號機反應器廠房內的反應器大樓的用過燃料池，則由 2 號機負責進行管理。

此外，假若將 1 號機反應器廠房內的所有用過核燃料移至 2 號機反應器廠房內的用過燃料池，則 2 號機用過燃料池（1 號及 2 號機共用）將不列為除役對象設施，而 1 號機反應器廠房內的所有用過核燃料則視為已從除役對象設施中移出。

部份的新燃料貯存在 1 號機反應器廠房內的新燃料貯存庫中，在轉讓之前將繼續貯存於該處。另一部分的

新燃料則貯存在 1 號機反應器廠房內的用過燃料池，同樣在轉讓之前將暫時貯存於該處。

在新燃料的處理及貯存方面，將維護管理現有設施，以確保必要的燃料處理、防止臨界等功能。另外，由於新燃料的活度較低，因此不需要特別考慮衰變熱的移除及輻射屏蔽問題。

(五) 核燃料的移出及轉讓

用過核燃料將全部運往再處理設施，並轉讓給再處理業者。用過核燃料可直接從 1 號機反應器廠房內的用過燃料池，或者經由 2 號機反應器廠房內的用過燃料池（1 號及 2 號機共用）進行移出。用過核燃料的轉讓作業必須在反應器本體拆除作業開始之前完成。

新燃料則必須在反應器區域周圍設備拆除作業開始之前，全部運往加工設施並轉讓給燃料加工業者。需要注意的是，貯存在 1 號機用過燃料池中的新燃料在轉讓之前，需經過拆解、除污處理、重新組裝成燃料束，然後再暫時貯存於新燃料貯存庫中，方可進行轉讓。為確保安全處理燃料棒，在進行這項作業時，使用專用的作業平台，以防止燃料棒變形或損壞，同時從防止臨界的角度考量，限制每次處理的燃料棒數量僅限於一組燃料束。

表 3-4 核燃料的移出及轉讓方式[6]

種類	核燃料管理及轉讓方式
用過核燃料 (722 組)	- 計畫將用過核燃料全數運往再處理設施，並轉讓給再處理業者。 - 有關燃料移出方式，將直接從 1 號機用過燃料池或經由 2 號機用過燃料池進行。 - 在「反應器區域拆除階段(第三階段)」開始之前，完成燃料的轉讓作業。 - 用過核燃料在轉讓之前，將貯存於現有的用過燃料池。 - 將維護管理現有的用過核燃料吊運設備及貯存設施，以確保其功能完整。
新燃料 (92 組)	- 新燃料在轉讓之前，將貯存於現有的新燃料貯存庫及用過燃料池。 - 在「反應器區域周圍設備拆除階段(第二階段)」開始之前，將新燃料轉讓給燃料加工業者。 - 按照預定的規劃進度，島根 1 號機已在第一階段完成了新燃料的移出及轉讓作業⁹。

⁹ 島根 1 號機用過燃料池中的新燃料，在經過除污作業後，被移至新燃料貯存庫中貯存。該貯存庫內共計貯存有 92 組新燃料。島根 1 號機於 2018 年 6 月 1 日開始進行新燃料的移出及轉讓作業，並於 2018 年 9 月 7 日順利完成此項作業。目前，島根 1 號機的所有新燃料已全數運送至加工設施，並成功轉讓給加工業者。

(六) 用過核燃料的貯存期長

根據 NRA 除役計畫審查標準¹⁰的規定：在著手進行燃料處理設備及燃料貯存設施的拆除作業之前，首先必須進行用過核燃料及新燃料的移出作業。在移出之前，這些核燃料會被妥善貯存於相應的貯存設施中。同時，確保安全功能所需的必要設備得到適當的維護管理。

島根 1 號機的用過核燃料池中總計貯存 722 組（約 122.7 噸）的用過核燃料。依據島根 1 號機的除役計畫，在第三階段開始前（預計於 2030 年度），所有用過核燃料將全數運往再處理設施並轉讓給再處理業者。然而，由於用過核燃料仍具有餘熱，因此需要在燃料池中經過一定時間的持續冷卻。由於目前尚無法確定青森縣六所村再處理廠的啟用時間。鑑於此情況，島根核電廠也在考慮將島根 1 號機的用過核燃料移至 2 號機用過燃料池，作為一個可能的方案。

新燃料方面，目前島根 1 號機的所有新燃料已全數運送至加工設施，並成功轉讓給加工業者。符合預定的規劃進度，已於第一階段完成新燃料的移出及轉讓作業。

¹⁰ 「發電用反應器設施及試驗研究用等核設施除役計畫審查標準」2013 年 11 月 27 日原子力規制委員會決定

根據島根核電廠 1 號機的除役計畫，除役開始後預計島根 1 號機的核燃料最久將在核電廠內貯存約 14 年。在此期間內，必須進行並完成所有用過核燃料的移出及轉讓作業。



圖 3-5 島根 1 號機的用過燃料池¹¹

(七) 除役期間反應器設施的維護管理

為避免輻射影響，相關設備將在必要的期間內進行維護管理。維護管理的時間將視設備而有所不同。需進

¹¹ 圖片出處：中國新聞(<https://www.hiroshimapecemedia.jp/?p=42190>)

行維護管理的設備包括：

1. 防止放射性物質污染周圍環境的設備：

反應器廠房建築物、通風設備，以及放射性廢棄物處理設施等。

2. 確保除役作業安全的設備：

區域監測器等輻射管理設施、柴油發電機等備用電源設備，以及滅火設備等。

(八) 除役期間用過燃料池的維護管理

目前 1 號機用過燃料池內存放著 722 組用過核燃料。

為確保用過燃料池冷卻所需功能的運作，例如電源供應功能、防止臨界功能以及冷卻淨化功能等，正在進行妥善的維護管理。

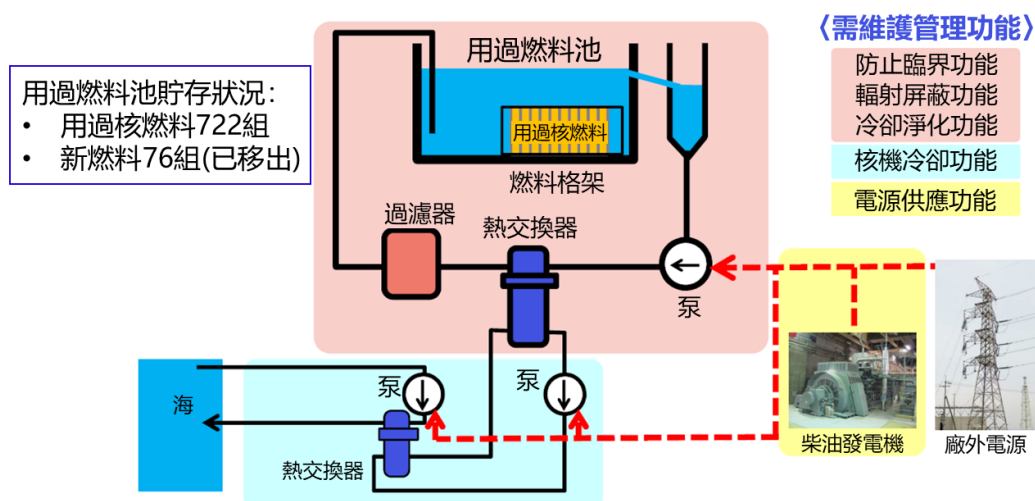
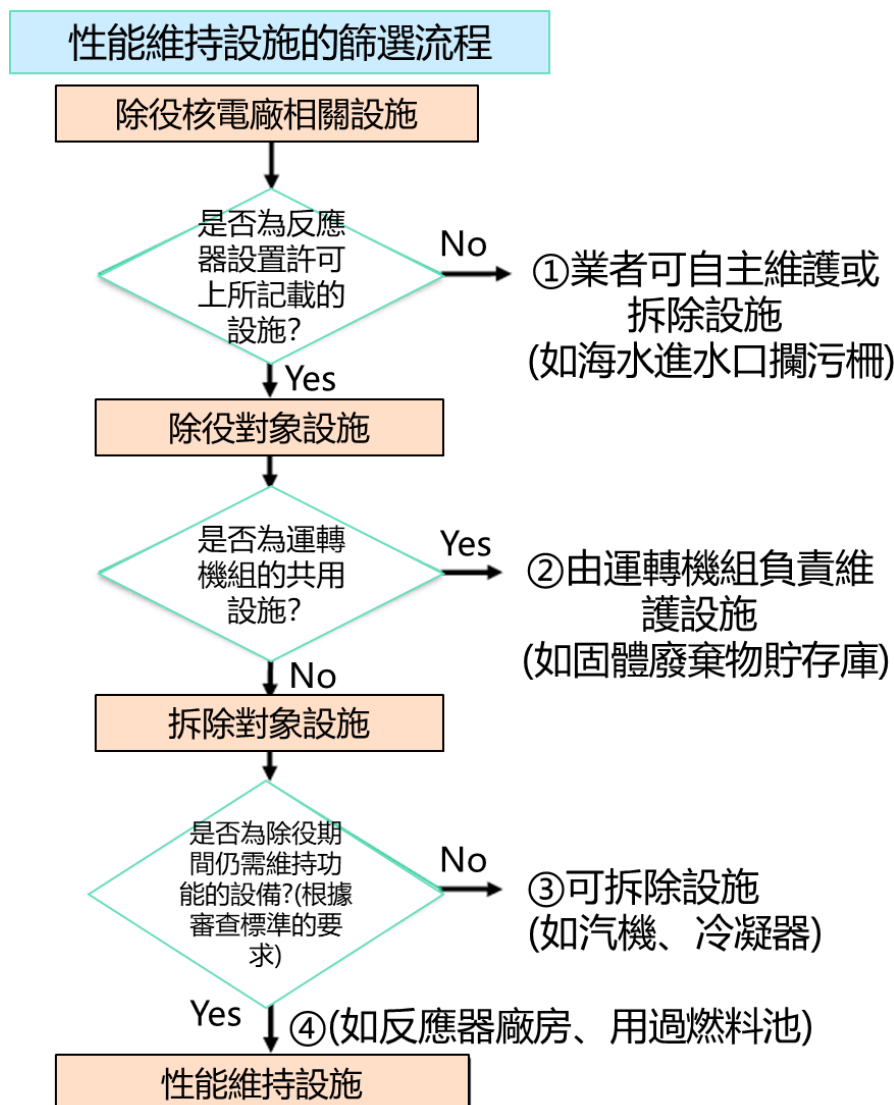


圖 3- 6 除役期間用過燃料池需維護管理功能[6]

(九) 除役期間應維持其功能、性能的設備及期間

為確保安全除役，針對除役期間仍需持續維持其功能及性能¹²的施設，以下簡稱為「性能維持施設」，將根據除役作業進展情形，進行維護及管理。

性能維持施設可依據以下流程圖所示的方法進行篩選：



¹² 根據日本「實用發電用反應器及其附屬設施技術標準相關規則」中的說明，性能的定義是指維持除役階段所需功能的必要狀態。

除役期間仍需維持功能的設施及設備，其目的在於降低周圍公眾及輻射工作人員的輻射曝露，以及確保各項除役作業能夠安全實施，包括用過核燃料的貯存管理、除污作業、拆除作業及核燃料污染物的廢棄作業等，因此應於必要的期間內，維護管理其必要功能。

在除役第一階段，即拆除作業準備階段，島根 1 號機將持續維護管理以下設施功能：

- 針對含有放射性物質的系統及組件所在的廠房及結構物，在進行這些系統及組件的拆除之前，需要持續維護管理以防止放射性物質外洩，確保其障壁及輻射屏蔽功能。
- 對於核燃料吊運及貯存設施，在用過核燃料移出 1 號機之前，將持續維護管理其燃料吊運、防止臨界、冷卻淨化等功能。
- 放射性廢棄物的處理設施，將維護管理其處理等功能，以適當處理及排放放射性氣體廢棄物及放射性液體廢棄物。此外，為了適當處理、貯存及保管放射性固體廢棄物，將維護管理其處理、貯存等功能。
- 輻射管理設施，將維護管理其輻射監測及管制排放的功能，以便對反應器設施內外進行輻射監測、管制放

射性物質向環境中的排放，以及管制區內工作人員的曝露管理。

- 通風設備，考慮到用過核燃料的貯存管理、放射性廢棄物的處理，以及減少工作人員的輻射曝露等，將維護管理廠房內的通風系統功能。
- 從防止輻射危害的角度考量，對於消防設備，將維護管理其必要功能。
- 電源設備，將確保反應器設施安全所需的適當容量，並維護管理各設備所需的電源供應功能。
- 其他安全確保所需設備，將維護管理各設備所需的功能。

發電反應器設施除役期間仍需維持的功能，包括防止臨界、防止燃料掉落、適當處理放射性廢棄物、管制放射性物質向環境中的排放、反應器設施內的輻射監測及輻射管理、防止放射性物質污染擴散的通風功能、確保用過核燃料貯存設施安全所需的電源供應等功能。

在下表 3-5 至表 3-12 中，詳列了島根 1 號機用過核燃料仍貯存於用過燃料池期間所需要維護管理的設施、設備以及其功能、性能及維持期間：

表 3-5 廠房及結構物[17]

設施類別	設備類別	設備或廠房名稱	需維持功能	需維持性能	需維持期間
反應器本體	輻射屏蔽體	壓力槽外側屏蔽牆	輻射屏蔽功能	不得有顯著損壞而影響輻射防護。	直到爐心支撐結構物等輻射等級較高的結構拆除完畢為止
		乾井外圍牆壁			
		反應器廠房外牆			
反應器圍阻設施	其他主要事項	反應器廠房	防止放射性物質洩漏功能 (不包括事故時備用氣體處理系統所提供的負壓功能)	不得有顯著損壞而導致放射性物質洩漏至外部。	直到管制區解除為止

其他主要設施	廠房及結構物	廢棄物處理廠房	防止放射性物質洩漏功能 輻射屏蔽功能	• 不得有顯著損壞而導致放射性物質洩漏至外部。 • 不得有顯著損壞而影響輻射防護。	直到各廠房管制區解除為止
		汽機廠房			

表 3-6 核燃料吊運設施[17]

設施類別	設備類別	設備或廠房名稱	需維持功能	需維持性能	需維持期間
核燃料吊運及貯存設施	核燃料吊運設備	燃料吊運機具 (1 號機反應器廠房內)	燃料吊運功能 防止臨界功能 防止燃料掉落功能 (不包括爐心內、 爐心與燃料池之間的燃料吊運功能)	- 可吊運新燃料及用過燃料，並在吊運過程中維持在正常運作狀態，不使新燃料及用過燃料受到損壞。 - 在吊運新燃料或用過核燃料過程中，即使喪失電源，亦能夠確保新燃料或用過核燃料保	在 1 號機所有核燃料完全移出廠外之前

				持在穩定狀態。	
		反應器廠房天車 (1 號機反應器 廠房內)	燃料吊運功能 防止臨界功能 防止燃料掉落功能	• 可吊運新燃料及用過燃料，並在吊運過程中維持在正常運作狀態，不使新燃料及用過燃料受到損壞。 • 在吊運新燃料或用過核燃料過程中，即使喪失電源，亦能夠確保新燃料或用過核燃料保持在穩定狀態。	
		運輸容器除污設	燃料吊運功能	• 不得有顯著損壞而影	

		備（除污區）		響用過核燃料運輸容 器的除污。	
--	--	--------	--	--------------------	--

表 3-7 核燃料貯存設施[17]

設施類別	設備類別	設備或廠房名稱		需維持功能	需維持性能	需維持期間
核燃料吊運及貯存設施	核燃料貯存設備	新燃料貯存庫（包含新燃料貯存格架）		防止臨界功能	不得有變形等顯著損壞而使新燃料達到臨界狀態。	在 1 號機貯存的新燃料完全移出廠外之前
		用過核燃料貯存設施	用過燃料池（包括貯存格架、燃料池水位及燃料池水洩漏的監控設備）	防止臨界功能 輻射屏蔽功能 水位監控功能 洩漏偵測功能	- 不得有變形等顯著損壞而使新燃料及用過燃料達到臨界狀態。 - 可進行燃料池水位的測量，並達到	在 1 號機貯存的用過核燃料完全移出廠外之前

						警報設定值時發出警報。 • 用過燃料池水洩漏偵測設備處於可用狀態。	
		用過核燃料貯存設施	燃料池冷卻系統	冷凝水除礦設備 泵 熱交換器	冷卻淨化功能 燃料池補水功能	• 能夠冷卻燃料池水的狀態。 • 在用過核燃料護套有嚴重腐蝕疑慮的情況下，能夠讓用過燃料池水通過冷凝水除礦	在 1 號機貯存的用過核燃料完全移出廠外之前

						設備。	
反應器冷卻系統設施	一次側冷卻設備	冷凝水貯存槽 （包含補水管路）			燃料池補水功能	不得有裂縫或變形等顯著缺陷而使所含放射性物質洩漏。	在 1 號機貯存的用過核燃料完全移出廠外之前

表 3-8 放射性廢棄物的處理設施[17]

設施類別	設備類別	設備或廠房名稱	需維持功能	需維持性能	需維持期間
放射性廢棄物的處理設施	氣體廢棄物的處理設施	煙囪	放射性廢棄物處理功能	不得有顯著損壞而影響放射性氣體廢棄物的排放。	直到放射性氣體廢棄物處理完成為止
		汽機廠房煙囪			
	液體廢棄物的處理設施	冷凝器冷卻水出口 (1 號及 2 號機共用)	放射性廢棄物處理功能	不得有顯著損壞而影響放射	直到放射性液體廢棄物處理完成為

					性液體廢棄物的排放。	止
		地面洩水及再生廢液系統（1號及2號機共用）	濃縮器	放射性廢棄物處理功能	不得有顯著損壞而影響放射性液體廢棄物的排放。	直到放射性液體廢棄物處理完成為止

	固體廢棄物的處理設施	減容機（1 號機建築物內） （1 號及 2 號機共用）		放射性廢棄物處理功能	能夠處理放射性固體廢棄物的狀態。	直到放射性固體廢棄物處理完成為止
	液體廢棄物的處理設施	組件洩水系統（1 號機建築物內） （1 號及 2 號機共用）	廢液收集槽 廢液取樣槽 廢液調節槽 過濾器 除礦器	放射性廢棄物處理功能	不得有裂縫或變形等顯著缺陷而使所含放射性物質洩漏。	直到放射性液體廢棄物處理完成為止
		地面洩水及再生廢液系	地面洩水槽 廢液中和槽			

		統（1 號及 2 號機共用）	地面洩水槽			
			過濾器			
			除礦器			
		淋浴洩水系	淋浴洩水槽			
		統（1 號及 2 號機共用）	過濾器			
	固體廢棄物的處理設施	濃縮廢液貯存槽		放射性廢棄物貯存功能	•	直到放射性固體廢棄物處理完成為止
		用過樹脂貯存槽				
		過濾沉澱物貯存槽				
		過濾沉澱物調節槽				
		冷凝水沉澱物分離槽				

其他反應器的附屬設施	其他主要事項	調節槽（輔助調節槽）	放射性廢棄物處理功能		直到放射性液體廢棄物處理完成為止
------------	--------	------------	------------	--	------------------

表 3- 9 輻射管理設施[17]

設施類別	設備類別	設備或廠房名稱		需維持功能	需維持性能	需維持期間
輻射管理設施	廠房內部管理用的主要設備	區域監測器（核燃料貯存設備區、核機冷卻系統區、放射性廢棄物的廢棄設備區）		輻射監測功能	- 能夠測量等效劑量率。 - 達到警報設定值時發出警報。	直到相關設備不再使用為止
	廠房外部管理用的主要設備	煙囪監測器	煙囪監測器	輻射監測功能	能夠測量放射性物質的濃度。	直到放射性氣體廢棄物
			汽機廠房煙囪監測器	排放管理功能	達到警報設定值時發出警報。	處理完成為止

		排水監測器	廢棄物處理排水監測器	輻射監測功能 排放管理功能	- 能夠測量放射性物質的濃度。 - 達到警報設定值時發出警報。	直到放射性液體廢棄物處理完成為止
		排水取樣監測器	排放渠道水監測器			
		製程水監測器（核機冷卻水系統熱交換器出口） （海水側）		輻射監測功能	- 能夠測量放射性物質的濃度。 - 達到警報設定值時發出警報。	直到核機冷卻水系統不再使用為止

表 3- 10 通風設備[17]

設施類別	設備類別	設備或廠房名稱			需維持功能	需維持性能	需維持期間
反應器圍阻設施	其他主要事項	反應器廠房通風系統			通風功能	進氣扇及排氣扇處於正常運轉狀態。	直到管制區解除為止
其他主要設施	核電廠輔助設備	通風系統	汽機廠房通風系統	進氣扇			
				排氣扇			
				過濾器			
			廢棄物處理廠房通風系統	進氣扇			
				排氣扇			
				過濾器			

表 3- 11 緊急電源設備[17]

設施類別	設備類別	設備或廠房名稱	需維持功能	需維持性能	需維持期間
其他反應器附屬設施	緊急電源設備	柴油發電機	電源供應功能（不包括自動啟動及自動供電功能）	能夠供應電源給性能維持設施（包括燃料池冷卻系統泵、核機冷卻水系統泵及海水泵）。	在 1 號機貯存的用過核燃料完全移出廠外之前
		蓄電池（廠內用）	電源供應功能	能夠供應電源給性能維持設施（柴油發電機）。	

表 3-12 其他安全確保所需設備[17]

設施類別	設備類別	設備或廠房名稱		需維持功能	需維持性能	需維持期間
反應器冷卻系統	其他主要事項	核機冷卻系統	熱交換器	核機冷卻功能	能夠供應冷卻水給性能維持設施(燃料池冷卻系統)。	在 1 號機用過核燃料完全移出廠外之前
			泵			
			海水泵			
其他主要設施	核電廠輔助設備	消防設備	消防栓	消防功能	消防設備處於可用狀態。	直到各廠房各區域所設置的設備不再使用為止
			可攜式滅火器			
	照明設備	緊急照明		照明功能	緊急照明處於可開啟狀態。	直到各廠房各區域所設置的設備不再使用為止

表 3- 13 除役期間與運轉時的功能差異比較[3]

需維護管理設備	除役期間與運轉時的功能差異
燃料吊運機具	由於用過核燃料已從反應器爐心中完全取出，且不得再次裝填入爐心內，因此無需維持爐心內、爐心與用過核燃料池之間的燃料吊運功能。
反應器廠房	由於反應器已永久停止運轉，且根據「用過燃料池內燃料束掉落事故」(詳後述)的評估結果，認為即使不使用備用氣體處理系統對環境造成的影響也很小，因此無需維持反應器廠房相關的負壓功能，例如事故時所使用的備用氣體處理系統。
柴油發電機	由於反應器已永久停止運轉且貯存的用過核燃料已足夠冷卻，因此無需維持即時電源供應功能，包括自動啟動與自動供電功能。

1. 用過燃料池內燃料束掉落事故評估

在第一階段中，由於仍在貯存用過核燃料，因此暫不進行處理放射性物質區域的拆除作業，並且會持續對具有輻射管理功能的設備進行維護管理。因此，將繼續保持與反應器運轉期間進行施設定期檢查（大修）時相同的狀態。

根據以上內容，在評估第一階段中放射性物質洩漏事故時，係參考反應器設置許可申請書¹³中，針對「用過核燃料貯存設施（燃料池）內燃料束掉落」事故的評估。該情況是假設燃料束掉落導致燃料棒受損，使其中的分裂產物被釋放至大氣中。

根據該評估結果顯示，周圍民眾受到的有效劑量為 0.00049 毫西弗¹⁴，因此認為周圍民眾所受到輻射曝露的風險非常小。

¹³ 從反應器的設置到除役，都需要製作並向政府提交許多文件。其中之一，即反應器設置許可申請書，是根據「核原料物質、核燃料物質及原子爐規制法（簡稱原子爐等規制法）」的規定，申請者在進行設施的設置及變更時，必須提交這份申請書以確保反應器設施的安全性，並接受管制機關的審查。

¹⁴ 在「發電用輕水式反應器設施的安全評估審查導則」中，規定事故發生時周圍民眾所受的輻射曝露劑量應保持在 5 毫西弗以下。

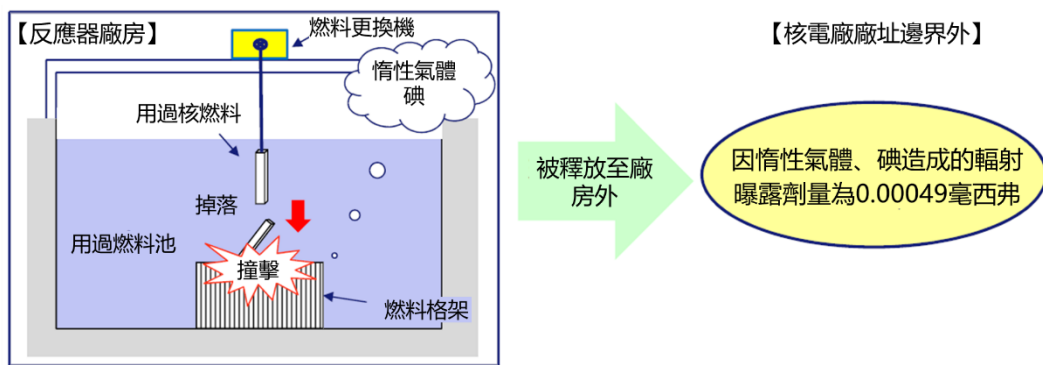


圖 3- 7 用過燃料池內燃料束掉落事故評估[7]

(十) 用過燃料池水位及水溫標準

用過燃料池中貯存用過核燃料期間，用過燃料池的水位及水溫應符合表 3- 14 中所列的設施運營標準。

為確保用過燃料池的水位及溫度符合設施運營標準，應每日進行一次確認。

表 3- 14 用過燃料池水位及水溫標準[8]

項目	設施運營標準
用過燃料池的水位	水位高度維持在溢流口附近
用過燃料池的水溫	65 °C以下

當確認用過燃料池的水位或水溫未符合設施運營標準時，則需採取表 3- 15 中所列措施：

表 3- 15 用過燃料池水位及水溫未符合標準時應採取的措施[8]

條件	需要採取的措施	完成時間
A. 當確認用過燃料池的水位或溫度未符合設施運營標準時	A1. 確保注水手段，以維持用過燃料池的水位以及 A2. 停止用過燃料池內受照射燃料的相關作業	盡快 之後每日一次 盡快

(十一) 用過核燃料貯存安全規定

有關用過核燃料的貯存，應遵守以下規定：

- 用過核燃料貯存於用過燃料池內。
- 於用過燃料池的顯眼位置處，張貼燃料貯存設施的用途及貯存上的注意事項。
- 使用燃料吊運機具。
- 確認已採取措施，確保用過燃料池內的燃料不會達到臨界狀態。

(十二) 除役期間用過燃料池的安全對策

有鑑於福島第一核電廠事故的經驗教訓，為因應電廠可能發生全黑(Station Blackout, 簡稱 SBO)狀態的情況，

因此配置了可攜式替代注水設備及高壓發電車，作為一項重要的安全對策。該設備的目的在於確保在發生緊急狀況時，能夠提供必要的注水功能，以確保燃料束得到適當的冷卻。

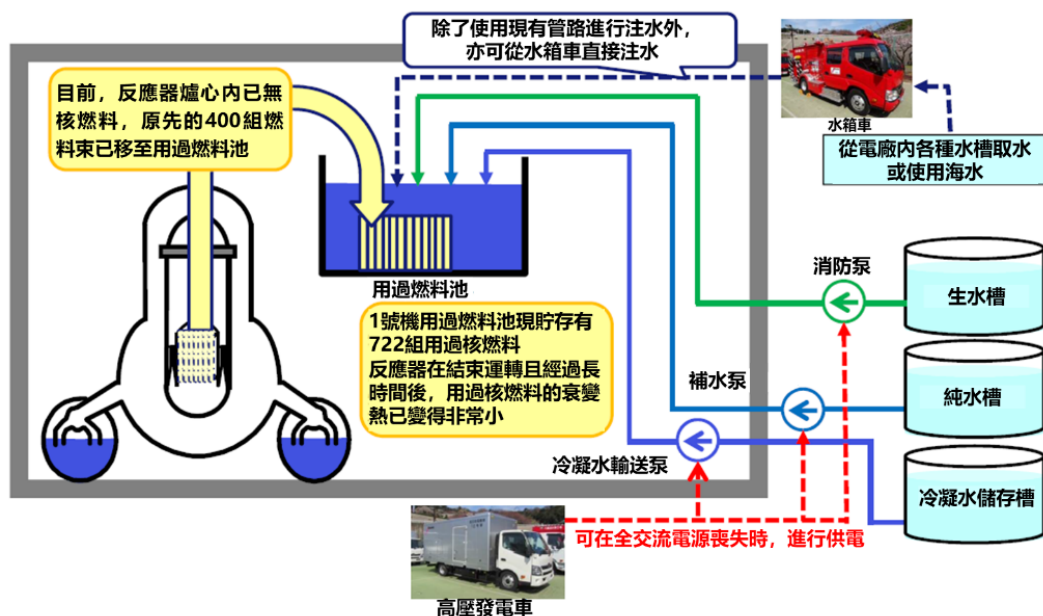


圖 3-8 除役期間用過燃料池的安全對策[6]

(十三) 用過核燃料冷卻水喪失時的燃料完整性評估

根據 NRA 除設計畫審查標準¹⁵的規定：用過核燃料貯存施設中仍存放用過核燃料期間，應考慮到可能發生冷卻水大量洩漏的情況。因此對於減緩用過核燃料嚴重熔毀及防止臨界等嚴重事故因應設備的拆除，應事先適當評估需要維護管理該功能的期間，或適當評估是否已

¹⁵ 「發電用反應器設施及試驗研究用等核設施除役計畫審查標準」2013 年 11 月 27 日原子力規制委員會決定

不再需要該設備。

島根 1 號機用過燃料池內貯存 722 組用過核燃料，針對其中具有最大衰變熱發熱量的燃料束(發熱量為 0.360 kW)，在自然對流的空氣冷卻條件下，對燃料護套的表面溫度進行了評估。

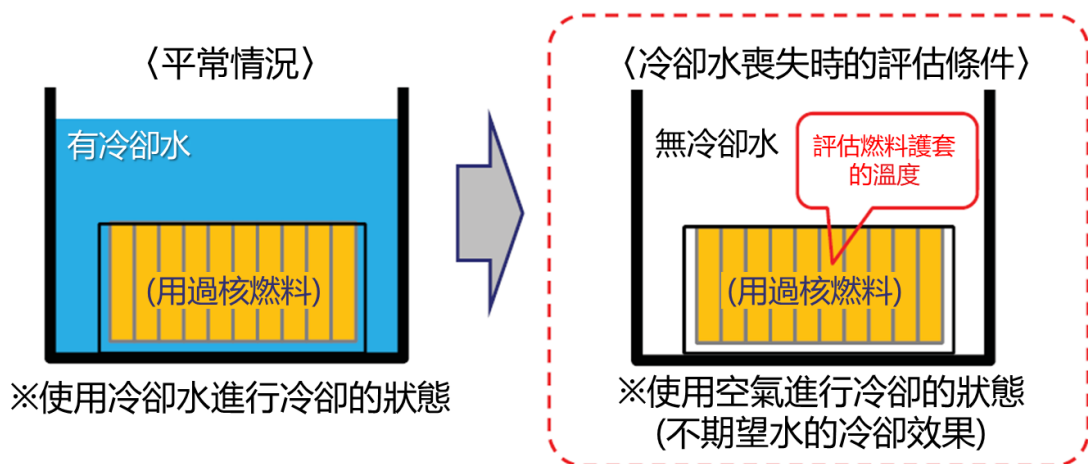


圖 3-9 用過核燃料冷卻水喪失時的燃料完整性評估[6]

1. 用過核燃料的完整性評估流程

- (1) 反應器廠房內的空氣溫度（室內溫度）在與外部空氣溫度（以保守條件設定為 70 °C）達到平衡時，求得反應器廠房內的空氣溫度為 119 °C。
- (2) 將反應器廠房內的空氣溫度作為燃料束入口的空氣溫度，根據衰變熱，求得燃料束的出口空氣溫度為 351 °C。

(3) 根據燃料束的出口空氣溫度以及空氣與護套之間的熱傳係數(Heat Transfer Coefficient)反推求得燃料護套溫度為 358 °C。

即使在冷卻水瞬間全部喪失的情況下，由於空氣的自然循環，用過核燃料仍能夠冷卻，燃料護套溫度能夠維持在約 360 °C以下，因此不會損及用過核燃料的完整性。

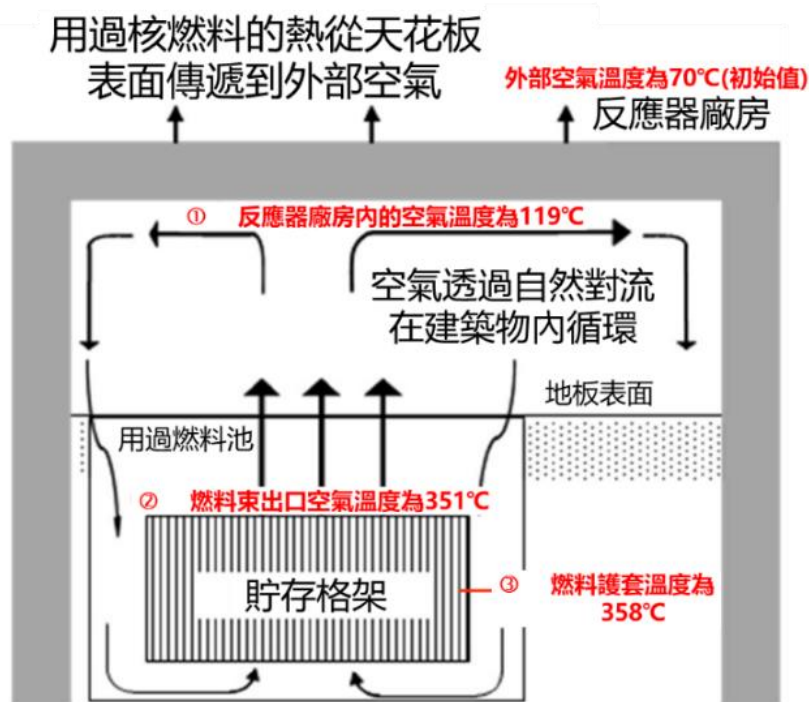


圖 3- 10 用過核燃料完整性的評估方法[4]

2. 用過核燃料的完整性評估內容

(1) 燃料束的完整性評估：

對具有最大衰變熱的燃料束進行評估，在自然對

流的空氣冷卻條件下，評估燃料護套的表面溫度。結果顯示燃料護套的表面溫度最高不超過 360 °C 且燃料護套於此溫度下發生潛變破裂 (Creep Rupture) 的時間超過一年，因此可確保燃料束的完整性。

(2) 臨界評估：

在燃料池整體低水密度條件（水密度在 0.0~1.0 g/cm³ 之間均勻變化）下，進行了有效增殖因數 (Effective Multiplication Factor) 的評估。結果顯示，於此貯存格架內的燃料束配置情況下，即使考慮有效增殖因數的不確定性，最大為 0.925，因此即便發生水密度減少的情況，亦能夠避免臨界反應。

(3) 嚴重事故因應設備的必要性：

即使考慮到用過燃料池冷卻水大量洩漏的情形，燃料護套表面溫度上升亦不會對燃料完整性造成影響，且確認不會到達臨界狀態，因此已不再需要用於減緩用過核燃料嚴重熔毀以及防止臨界所使用的嚴重事故因應設備¹⁶。

¹⁶ 嚴重事故因應設備（為符合新規制基準而增設的設備），簡稱 SA 設備，是指：即使設計基準

經過評估後，確定除役期間已不再需要的嚴重事故因應設備（簡稱 SA 設備）其中包括了防止氫氣爆炸造成反應器廠房損壞的 SA 設備，詳細內容可參考下表 3- 16：

表 3- 16 用以防止反應器廠房氫氣爆炸的嚴重事故因應設備[12]

SA 功能分類	設備名稱	
藉由被動式觸媒氫氣再結合器進行氫氣濃度的抑制	主要設備	被動式觸媒氫氣再結合器
		被動式觸媒氫氣再結合器入口溫度
		被動式觸媒氫氣再結合器出口溫度
	流徑	反應器大樓
	電源設備 (包括電路)	固定式替代直流電源設備
		• SA 用 115V 系統蓄電池 • SA 用 115V 系統充電器
		可攜式直流電源設備 • 高壓發電車 • SA 用 115V 系統充電器 • 燃氣渦輪發電機輕油槽 • 油罐車

事故因應設備的功能喪失，仍能有效防止爐心嚴重熔毀、防止反應器圍阻體損壞，或抑制放射性物質釋放至環境中的設備。

		為供電給固定式替代直流電源設備而設置的設備 • 固定式替代交流電源設備 • 可攜式替代交流電源設備
反應器廠房內的氫氣濃度監控	主要設備	反應器廠房氫氣濃度
	電源設備 (包括電路)	固定式替代交流電源設備 • 燃氣渦輪發電機 • 燃氣渦輪發電機輕油槽 • 燃氣渦輪發電機廠用貯存槽 • 燃氣渦輪發電機用燃油輸送泵
		可攜式替代交流電源設備 • 高壓發電車 • 燃氣渦輪發電機輕油槽 • 油罐車

肆、 管制關鍵要項

- 有關吊運用過燃料池所貯存的燃料，其吊運設施的管制建議如下：

1. 確認燃料吊運機具及反應器廠房天車能夠順利吊運新燃料及用過燃料，同時在吊運過程中保持正常運作狀態，以防止新燃料及用過燃料受到損壞。並且，在吊運新燃料或用過燃料過程中，即使喪失電源，亦能夠確保新燃料或用過核燃料維持在穩定狀態。在新燃料及用過燃料完全移出廠外之前，應確保其燃料吊運功能、防止臨界功能及防止燃料掉落功能（不包括爐心內、爐心與燃料池之間的燃料吊運功能）正常。
2. 確認運輸容器除污設備的外觀無顯著損壞，以確保不影響用過核燃料運輸容器的除污。在新燃料及用過燃料完全移出廠外之前，應確保其燃料吊運功能正常。

- 有關用過燃料池的管制建議如下：

1. 確認用過燃料池（包括貯存格架、燃料池水位及燃料池水洩漏的監控設備）無變形等顯著損壞，以防止新燃料或用過核燃料達到臨界狀態。同時，確認能夠進行燃料池水位的測量，並在水位達到警報設定值時發出警報。確認用過燃料池水洩漏偵測設備處於可用狀

態。在用過核燃料完全移出廠外之前，必須確保能夠維持其防止臨界功能、輻射屏蔽功能、水位監控功能及洩漏偵測功能。

2. 燃料池冷卻系統方面，確保冷凝水除礦設備、泵及熱交換器能夠有效冷卻燃料池水。在用過核燃料護套存在嚴重腐蝕疑慮的情況下，應確保能夠讓用過燃料池水通過冷凝水除礦設備。在用過核燃料完全移出廠外之前，應確保冷卻淨化及燃料池補水功能正常。

伍、 參考文獻

- [1] 中國電力公司、「島根核電廠 1 號機除役計畫認可申請書及附件」、
2017 年 2 月 14 日修訂
- [2] 中國電力公司、「重新審視 1 號機除役計畫用過核燃料的完整性
評估」、2017 年 1 月
- [3] 中國電力公司、「島根核電廠 1 號機除役計畫的審查狀況」、2017
年 1 月 25 日
- [4] 中國電力公司、「島根核電廠 1 號機除役計畫的審查狀況」、2017
年 2 月 23 日
- [5] 原子力規制廳、「中國電力島根核電廠 1 號機除役計畫符合實用
爐第 119 條所規定認可標準的審查結果」、2017 年 4 月
- [6] 中國電力公司、「島根核電廠 1 號機除役計畫的概要」、2016 年 5
月 31 日
- [7] 中國電力公司、「島根核電廠 1 號機除役計畫的概要」、2017 年 6
月 8 日
- [8] 中國電力公司、「島根核電廠反應器設施安全規定」、2017 年 10
月
- [9] 中國電力公司、「島根核電廠 1 號機的新燃料運輸狀況」、2018 年
- [10] 原子力規制委員會、「發電用反應器設施及實驗研究用等核設施
除役計畫審查標準」、2020 年 12 月 9 日修訂

- [11]池田信二、谷口達郎、「中國電力島根核電廠 1 號機的除役狀況」、
除役技術報告 No.58(2018 年 9 月)
- [12]中國電力公司、「島根核電廠 2 號機嚴重事故因應設備補充說明
資料」、2020 年 4 月
- [13]島根縣政府、「島根縣的核能 2021」、2021 年
- [14]中國電力公司、「島根核電廠的作業現況」、2021 年 1 月
- [15]中國電力公司、「島根核電廠 1 號機除役作業的現況」、2022 年 5
月 23 日
- [16]中國電力公司、「島根核電廠的作業現況」、2023 年 3 月
- [17]中國電力公司、「島根核電廠 1 號機除役計畫變更認可申請書的
概要」、2020 年 7 月
- [18]行政院原子能委員會委託研究計畫期末研究報告、「日本核設施
除役拆除實施標準研究」、2020 年 12 月