

行政院原子能委員會
放射性物料管理局
委託研究計畫研究報告

日本用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例研析
期末報告

委託單位：行政院原子能委員會放射性物料管理局
執行單位：國立高雄大學
計畫主持人：張惠雲
共同主持人：賴啟銘
計畫編號：107FCMA006
報告日期：中華民國 107 年 12 月 13 日

日本用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例研析 期末報告

受委託單位：國立高雄大學

研究主持人：張惠雲

共同主持人：賴啟銘

研究期程：中華民國 107 年 3 月至 107 年 12 月

研究經費：新臺幣 760,000 元

放射性物料管理局 委託研究

中華民國 107 年 12 月

(本報告內容純係作者個人之觀點，不應引申為本機關之意見)

計畫名稱：日本用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例研析

一、摘要

不論低放射性廢棄物或用過核子燃料都必須整體妥善管理，故包括美國與日本在內許多國家皆倡議設置集中貯存設施作為現階段的因應方式之一。考慮日本與台灣在自然環境與社會文化之相似性，因此，本委託研究計畫「日本用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例研析」，針對福島事件後日本用過核子燃料貯存設施新安全設計審查基準以及青森陸奧 (Mutsu) 廠外用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例進行研析，並根據研析結果提出我國「用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業導則 (草案)」之精進建議。

Both low-level radioactive waste and spent nuclear fuel need properly managing. Many countries, including the United States and Japan, therefore have advocated the establishment of interim offsite dry storage facilities as one of the countermeasures at this stage. Japan and Taiwan have many similarities in natural environment and social culture. In view of the fact, the research project entitled as “A Study on Design Review of an Interim Offsite Storage Facility in Japan” is to review the new safety design review standard for used nuclear fuel storage facilities in Japan after the Fukushima accident, and to study the case of interim offsite dry storage facilities in Mutsu, Aomori. Based on the results of the study, some suggestions will be also made for Taiwan's “Safety Standards and Review Guidelines for Spent Nuclear Fuel Storage Facilities (Draft)”.

二、計畫目標

國內主管機關目前以美國核管會 (NRC) NUREG-1567 持照審查技術報告為基礎，提出「用過核子燃料乾式貯存設施安全分報告審查規範 (草案)」與「用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業導則 (草案建議)」。

日本與台灣在自然環境與社會文化有很多相似之處，但用過核燃料貯存設施所用之乾貯護箱系統有所不同，本計畫研究因此研析 (1) 福島事件後日本用過核子燃料貯存設施新安全設計審查基準，(2) 青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例，與 (3) 國際間室內乾式貯存設施耐震設計及意外事故評估方法，以對 (4) 用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業提出建議。

三、重要成果

(一) 福島事件後日本用過核子燃料貯存設施新安全設計審查基準

1.1 日本福島事件後，用過核子燃料貯存設施之安全設計標準與審查

作業強制改為從新、從嚴，也就是即使是舊的設施也應依照最新的規範、持續檢討與提升安全性能。

1.2 日本原子力安全委員會在1992年公告並於2006年修訂了「關於核

電廠內用過核燃料乾式貯存設施」安全設計基準；福島事件後新

成立之原子力規制委員會 (NRA) 在2013年提出了「用過核燃料

貯存設施之位置、結構與設備的基準相關規則與解釋」取代之。

1.3 日本用過核燃料貯設施依耐震重要性可以分成S，B 與C三類。

用過核燃料貯系統等高放射性物料處理設備，去除崩壞熱，維持密封性與防止臨界相關設備，即列成最高S類（設計基準地震強度3.0倍）。破壞對環境影響小者為 B 類（1.5倍），其他為C 類（與一般建築物相同、設計基準地震強度1.0倍）。

1.4 福島事件後，新指針對設計基準地震之決定流程有大幅度修正，

進一步考慮更新世後期（距今約13萬年前）後曾活動的斷層，且新增要求考慮震源無法確定之內陸板塊間地震，另外也要求對海嘯、火山等自然災害加強防護。

（二）青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例

2.1 東京電力與日本原子力發電合資在青森縣陸奧（むつ Mutsu）

市成立 RFS（Recycle Fuel Storage）公司，經過陸奧市長確認安全性評估結果並徵詢各方意見後，才在2005年10月簽署「用過核子燃料中間貯存設施相關合作協議」，2007年3月向日本經濟產業大臣提出事業許可申請，2010年 5月獲准開始建設，而工程雖受311事件影響而一度中斷，但最後如期仍在2013年8月完工。

2.2 RFS 公司在2014年1月向原子力規制委員會（NRA）提出用過

核燃料貯存設施之新規制適法性確認審查。福島地震後新增要求考慮不特定震源之內陸板塊地震，加上2011年日本東北地方東

太平洋地震 (Mw=9.0)之影響，必須調整設計基準地震 Ss (600 gal) 之延時 (duration)。RFS公司對場址30 km 以內影響範圍進行更詳細的地質調查，以修正活斷層參數，而設計基準地震年超越機率 10^{-4} ~ 10^{-5} 間。

2.3 恐山是前述設施影響範圍內之火山，而 RFS 公司藉由地球物理調查，也就是利用地震波傳播速度來解析地下三維結構，進行影響評估。另外，新規範要求除了地震，也要考慮其他造成海嘯的原因，如陸地或海底之地層滑動，坡面破壞，火山（噴發，山崩與熔岩塌陷等），來評估設計基準海嘯與影響

(三) 國際間室內乾式貯存設施耐震設計及意外事故評估方法

3.1 護箱墜落 (drop) 或翻倒 (tip-over) 等假想的意外情境下反向加速度效果 (deceleration effects)，遠大於地震造成的結構反應加速度。故根據意外分析結果進行結構耐震再評估有其正當合理性。另一方面，若要電廠外獨立場址建置集中貯存設施，應充分考量運輸安全與應變措施。

3.2 根據日本與德國之專家意見，無論金屬護箱或混凝土護箱設計都有足夠之輻射防護能力。也因為如此，護箱系統理論上可以直接採露天貯存，而室內貯存所用建築物在設計上並不須額外要求提供輻射防護功能。

(四) 國內用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業建議

4.1 室內乾貯之設計審查重點有三，即輻射防護，結構安全與通風

機能。特別是，混凝土樓板須支撐貯存容器，具有核能安全功能，而上部建築結構僅為降低環境對貯存護箱之影響、不具核能安全功能，但考量海洋環境之影響應作耐候性要求，而整體建築設計更應分析確認不影響室內通風與護箱氣冷功能。

4.2 根據國際發展趨勢，中期貯存設施應進一步對50以上乃至300年很長時間，包括劣化等問題納入長期安全評估與影響研究計畫中。

四、 展望

無論是從設計理論或實務經驗來看，核能設施之安全性是奠基在可靠的基礎設施之上。國內過去已有用過核燃料室外貯存設施之設計審查經驗，在既有的基礎上持續提升設計審查與安全管制之能力，將可為國內用過核燃料提供室內貯存或廠外集中貯存之更多可能選項。福島事件後，國際核能設施已轉向性能規定、性能導向設計作發展，值得國內主管機關深入瞭解、以調整相關的設計審查業務。

性能規定/導向設計包括三個執行步驟：(1) 設定設計目標與性能水準，(2)為達成目標性能，採用適當的設計方法與設定結構參數，與 (3) 進行性能評估，確認達成設定的設計目標與性能水準。依設計者的想法與專業判斷，選擇適當的設計手法與工程技術；與過去比較，設計方法並未因性

能規定而改變。例如，結構性能設計仍應包含既有的容許應力計算與極限強度檢核。但是隨著設計(者)的觀點之改變，結果就允許設計(者)可以選擇更多不同的方法來實踐，例如更先進的調查方法或精度更高的分析法。

本計畫案例研究之日本青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施，為了檢核原有結構設計是否滿足福島事件後新規範要求，在設計基準地震、海嘯與火山之設定時，就採用了更先進的三維地質結構調查，此即為反映日本當局要求的性能規定/導向設計之結果。核能設施除了土木結構，還有建築機械與運輸設備。相對於廠內貯存，裝有用過核燃料之貯存護箱，送往廠外貯存的過程中，運輸安全性要求更是大幅度地提高，機械設備也要求有對應的性能目標與設計水準。也因此，本計畫研究蒐集與研析日本神戶製鋼報告，說明上述集中貯存設施建築物之內裝設備，為運輸安全、試運轉所製作的很多機械設備。

另外，與國內同樣採取混凝土護箱系統之英國 Sizewell B 核電廠內室內乾貯，其設計審查經驗是特別值得參考的。相較於室外乾貯，室內乾貯設計必須非常重視建築被動式通風設計，以確保貯存護箱本身可以持續自然氣冷、系統除熱性能不因建築物配置不當而有所受損。為了國內未來室內貯存與場外貯存之可能需求，除了輻射防護與土木結構，也應該進一步考慮機械設備與運輸安全，進行跨領域技術規範之審議研究。

中文摘要

不論低放射性廢棄物或用過核子燃料都必須整體妥善管理，故包括美國與日本在內許多國家皆倡議設置集中貯存設施作為現階段的因應方式之一。考慮日本與台灣在自然環境與社會文化之相似性，因此，本委託研究計畫「日本用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例研析」，針對福島事件後日本用過核子燃料貯存設施新安全設計審查基準以及青森陸奧 (Mutsu) 廠外用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例進行研析，並根據研析結果提出我國「用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業導則 (草案)」之精進建議。

關鍵詞: 設計審查, 乾貯集中設施, 案例研析

Abstract

Both low-level radioactive waste and spent nuclear fuel need properly managing. Many countries, including the United States and Japan, therefore have advocated the establishment of interim offsite dry storage facilities as one of the countermeasures at this stage. Japan and Taiwan have many similarities in natural environment and social culture. In view of the fact, the research project entitled as “A Study on Design Review of an Interim Offsite Storage Facility in Japan” is to review the new safety design review standard for used nuclear fuel storage facilities in Japan after the Fukushima accident, and to study the case of interim offsite dry storage facilities in Mutsu, Aomori. Based on the results of the study, some suggestions will be also made for Taiwan's “Safety Standards and Review Guidelines for Spent Nuclear Fuel Storage Facilities (Draft)”.

Keywords: Design Review, Interim Offsite Storage Facility, Case Study

目錄

中文摘要	I
Abstract	II
第一章 前言	
1.1 研究背景與目的	1
1.2 研究內容	2
第二章 日本用過核子燃料貯存設施新安全設計審查基準 研究	
2.1 修法經過	3
2.2 修法要點	4
2.3 法規演變	6
2.4 性能要求.....	8
第三章 日本青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施設計 審查案例研究	
3.1 案例研究對象	20
3.2 事業許可申請審查	21
3.3 新規制適法性審查	24
3.4 審查要項與管制建議	26

第四章 國際間室內乾式貯存設施耐震設計及意外事故評估

方法研析

4.1 乾貯設施特性與安全設計考量.....	30
4.2 德國室內乾貯與安全管制.....	33
4.2.1 德國乾貯設施發展背景.....	33
4.2.2 耐震設計與意外事故之評估要求.....	34
4.2.3 乾貯管制現況與未來展望.....	37
4.3 英國室內乾貯與安全管制.....	38
4.3.1 Sizewell B 核能電廠室內乾貯.....	38
4.3.2 耐震設計與意外事故之評估要求.....	39
4.3.3 設施啟用前安全審查與管制要求.....	40
4.4 日本集中貯存設施安全措施.....	42
4.5 綜合評比.....	44

第五章 我國用過核子燃料集中貯存設施安全標準與審查

作業導則草案精進建議

5.1 集中貯存設施特性與發展需求.....	46
5.2 設計審查與安全管制建議.....	49
5.3 性能規範與研究發展建議.....	51
參考文獻	54

第一章 前言

1.1 研究背景與目的

不論低放射性廢棄物或用過核子燃料都必須整體妥善管理，故包括美國與日本在內許多國家皆倡議設置集中貯存設施作為現階段的因應方式之一。國內主管機關以美國核管會 (NRC) NUREG-1567 持照審查技術報告[1-1] 為基礎，提出「用過核子燃料乾式貯存設施安全分報告審查規範 (草案)」與「用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業導則 (草案建議)」[1-2,3]。國內台電公司參考國際發展經驗並根據國內整體情勢，研擬規劃集中式放射性廢棄物貯存設施；為推動核一廠除役計畫，台電公司另規畫第二期室內乾貯設施 [1-4]。

日本與台灣在自然環境與社會文化有很多相似之處，但用過核燃料貯存設施所用之乾貯護箱系統有所不同[1-5]，本計畫研究因此研析 (1) 福島事件後日本用過核子燃料貯存設施新安全設計審查基準，(2) 青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例，與 (3) 國際間室內乾式貯存設施耐震設計及意外事故評估方法，最後提出我國「用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業導則 (草案)」之精進建議。本計畫研究結果將有助於瞭解福島事件後日本乾式貯存設施推廣策略與階段性成果，並可提供台灣未來進行室內乾貯設施設計審查與安全管制之參考。

1.2 研究內容

根據研究目的，本計畫規畫主要工作項目如下：

- (1) 福島事件後日本用過核子燃料貯存設施新安全設計審查基準研究
- (2) 日本青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例研究
- (3) 國際間室內乾式貯存設施耐震設計及意外事故評估方法研析
- (4) 提出我國用過核子燃料集中貯存設施安全標準與審查作業導則草案精進建議

第二章 日本用過核子燃料貯存設施新安全設計審查 基準研究

2.1 修法經過

2011年3月11日發生之福島事故，促使日本在2012年9月設置原子力規制委員會 (Nuclear Regulation Authority, NRA)，將過去由相關行政機關分擔之核能管制作業改由單一專責單位統一處理。為確認日本境內核能設施之安全性，NRA在2013年6月公布新的安全標準，並於2014年7月開始實施 [2-1,2]。福島事件後，日本國內外有很多的檢討意見，也發現以前的審查管制作業有以下之問題：

- 地震與海嘯等大規模自然災害不是管制的對象，所以未採取有效的對策。
- 就算修訂法規，也未強制既存核能設施隨之提高安全標準。

福島事件後 NRA 制定新的管制基準即為解決上述問題，並作為核能設施能否設置或運轉之判斷依據。

NRA 在 2013 年，根據管制核原料物質 (含鈾或鈾等礦石)、核燃料物質以及核反應爐相關法規 (昭和 32 年第 166 號法規，以下簡稱「核反應爐管制相關法規」) 施行新的管制基準，並開始適用性審查。關於適用性審查，NRA 根據已被認可的法規來進行，至於審查體制

或審查該如何具體的進行，也製作個別業務文件來對應。

充實核能設施審查指針，是2016年國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 之整合管制評審服務 (Integrated Regulatory Review Service, IRRS) 會議所揭示的課題之一。有鑑於此，日本用過核燃料貯存事業審查業務之參與人員，將適用性審查應參照之事項作整理，以作為落實審查作業之支持，又為提升業者對新管制基準適用性審查之理解與審查結果之可預期性，統合過去審查相關各委員會決議以及個別業務文件，並在2017年中由日本原子力規制部集結成一冊，也就是“使用済燃料の貯蔵の事業に関する審査業務の流れについて” [2-3]，提供參考。

日本用過核燃料貯存事業之新管制基準適用性審查業務 (用過核燃料貯存事業相關之特定容器等設計型式證明，以及用過核燃料貯存事業相關之特定容器等型式之指定 (簡稱型式證明與型式指定)) 雖已經歸納整理，但未來仍將根據審查方針之變更進行適當的修正。

2.2 修法要點

針對核燃料設施，NRA 制定新管制基準時考慮的重點包括：

- (1) 處理的核燃料之形態或設施結構具有多樣性，因此根據其特徵制定每種設施的管制基準 (即 graded approach)。
- (2) 基於深層 (in-depth) 防護之觀點擬定對策。

- (3) 再處理設施與加工設施之整備，應根據重大事故 (severe accident) 對策相關基準來進行。
- (4) 研究用核反應爐應依事故影響程度，對設計基準事故 (design base accident) 外應考慮事故，採取對策。
- (5) 廢棄物掩埋設施在使用管制期間應適切管理與進行定期評估，而設施廢止階段則應進行安全性評估等，以強化後期管理作業。
- (6) 制定基準時，日本除採取與 IAEA 安全要項相同之觀點，亦參考各國制定之基準，以與國際標準一致。

「設計基準事故」係為確保大眾的健康與安全，對於核能設施之各設備與系統，要決定設計條件或評估設計結果時所考慮之意外事故或事件情境。設計基準事故之設定會遵循一定之規則，假設機器破損或故障並加以排列組合。設計基準事故之件數雖然有限但須能涵蓋，核能設施所可能發生之無數的異常現象或事件經過與結果，藉以找出事故原因與掌握中間過程。設計基準事故也可說就是核能設施設置許可審請書中所記述的意外事故或事件情境。另一方面，「廢棄物埋設」是指核燃料或受其污染物，依據放射性選擇適切的埋設方法進行最終處理。新法規特別針對第二類「廢棄物埋設設施」，也就是地下處置坑與處置溝，要求強化後期之安全管理作業。

新管制基準仍然是以「深層防護」為基本，從防止共通原因所致

安全機能喪失之觀點，大幅地提升考慮的自然現象與對策。除了自然現象，也強化共通原因所致安全機能喪失之可能事件與現象（如火災等）的相關對策。針對用過核燃料貯存設施，NRA 新基準管制重點包括：

- (1) 須能適用於目前建設中的設施，即採用輸送與貯存併用之金屬護箱貯存系統。
- (2) 密封性等基本安全機能之維持，繼續沿用過去的基準進行管制。
- (3) 具備以自然對流來除熱之機能。

主要要求事項包括：

- (1) 用過核燃料貯存設施之設計：基本安全機能（密封性，遮蔽性，臨界防止與除熱）等。
- (2) 放射線管理等：放射線監視，與對長期變化之考慮等。
- (3) 其他安全對策：對自然現象之考慮，與對金屬護箱移動之考慮等。

上述「主要要求事項」之詳細內容，包括新舊法規內容比較與研議中的性能規定，進一步整理說明於 2.4 節。

2.3 法規演變

用過核燃料貯存事業是指，用過核燃料從核能發電廠發生到再處理之間的暫時貯存管理事業。根據日本核反應爐等管制法 [2-3, 4]，

用過核燃料貯存事業可分成 4 階段，也就是設計階段（含事業許可，設計與施工方法許可，以及銲接方法許可），建設階段（含使用前檢查，銲接檢查，保安規定許可，與輻射防護許可），營運階段（含保安檢查，輻射防護檢查與設施定期檢查，且必須維持適用技術基準之性能），與設施廢止階段（含設施廢止計畫許可與確認）。

福島事件後頒布的新基準主要是針對事業許可（基本設計），其他如建設，營運，與設施廢止各階段則參照過去的法規。新基準適用性審查、檢查流程包括同步進行之 (1) 設置(變更)許可審查，(2) 工程計畫認可審查，與 (3) 保安規定認可審查，與後續之保安(定期)檢查與設施(使用前)檢查，藉以判定核能設施可否（重新）啟用。

針對過用核燃料貯存事業，原子力規制委員會重新解釋審查或檢查相關訓令與內部規定 [2-4]，包括：

- 用過核燃料貯存設施之位置、結構與設備的基準相關規則與解釋 (2013 年 11 月 27 日決議制定，同年 12 月 18 日開始施行)
- 用過核燃料貯存設施設計與施工方法之技術基準相關規則與解釋 (2013 年 11 月 27 日決議制定，同年 12 月 18 日開始施行)
- 用過核燃料貯存設施相關之用過核燃料貯存事業主的設計與施工相關品質管理方法以及為其檢查之組織的技術基準相關規則與解釋 (2016 年 2 月 15 日決議制定並開始施行)

原子力規制委員會新頒布之施行細則:

- 用過核燃料貯存設施中保安規定之審查基準 (2013 年 11 月 27 日決議制定, 同年 12 月 18 日開始施行; 2015 年 8 月 5 日修訂, 2016 年 4 月 1 日開始施行)
- 用過核燃料貯存設施之定期評估相關運用指針 (2013 年 11 月 27 日決議制定, 同年 12 月 18 日開始施行)
- 用過核燃料貯存設施相關之特定容器等型式證明以及型式指定運用指針 (2013 年 11 月 27 日決議制定, 同年 12 月 18 日開始施行)
- 用過核燃料貯存設施之銲接檢查相關運用要領 (2014 年 2 月 26 日決議制定, 同年 3 月 1 日開始施行)
- 用過核燃料貯存設施中保安規定之審查基準 (2014 年 10 月 8 日決議制定並開始施行; 2015 年 6 月 5 日更正目錄)

2.4 性能要求

日本原子力安全委員會在 1992 年公告並於 2006 年修訂了「關於核電廠內用過核燃料乾式貯存設施」安全設計基準; 福島事件後新成立之原子力規制委員會 (NRA) 在 2013 年提出了「用過核燃料貯存設施之位置、結構與設備的基準相關規則與解釋」取代之。考量核電廠內建設中的乾式貯存設施所用之輸送與貯存併用的金屬護箱貯存

系統，日本原子能規制庁在 2017 年比較福島事件前後設計基準，並提出未來的性能型規定之修訂方向 [2-5,6]，包括：

- (1) 放射線劑量(率)從 $50\mu\text{Gy/y}$ 變更為 $50\mu\text{Sv/y}$
- (2) 配合設計特性之運輸與貯存併用護箱等耐震評估的留意點
- (3) 運輸與貯存併用護箱翻倒時密封性能評估相關要求事項
- (4) 建物損壞於運輸與貯存併用護箱之影響評估的留意點
- (5) 運輸與貯存併用護箱對自然現象之考慮
- (6) 不設置建物情況下之留意點
- (7) 監視條件之適正化
- (8) 事故時輻射影響評估之考慮方式
- (9) 大規模損壞時運輸與貯存併用護箱之對應

用過核燃料貯存設施所要求之基本安全機能，即除熱機能，遮蔽機能，密閉機能與臨界防止機能，相關設計基準比較整理於表 2.1。

表 2.1 日本用過核燃料貯存設施基本安全機能之設計基準 [2-6]

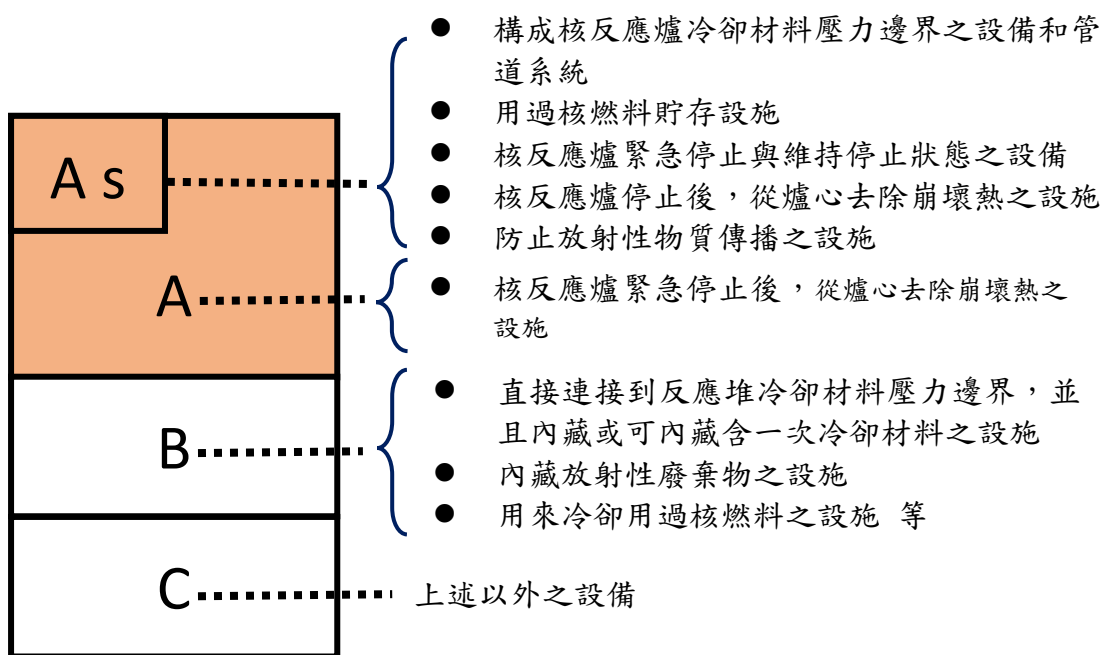
	基本安全機能(1/4)-除熱機能
福島事件前	<ul style="list-style-type: none"> ● 用過核燃料:設計貯存期間中被覆管累積潛變 (creep) 不超過 1%之溫度以下 ● 金屬護箱: 可確保護箱構件健全性之溫度以下 ● 貯存建物: 護箱周圍溫度妥當者
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● 用過核燃料: 從避免被覆管潛變破壞與機械性低落之觀點所訂的控制溫度以下 ● 金屬護箱: 從維持基本安全機能之觀點所訂的控制溫度以下 ● 貯存建物: 避免金屬護箱之除熱機能受到阻礙
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 符合用過核燃料貯存設施之要求 (理由: 著重在確保基本安全機能之性能來進行規定)

	基本安全機能(2/4)-遮蔽機能
福島事件前	<ul style="list-style-type: none"> ● 與其他設施合計, 空氣中 Gama 射線 $50 \mu\text{Gy/y}$ ● 核反應爐設施以 $50 \mu\text{Gy/y}$ 設計者可不評估 (設計許可基準規則第 29 條之解釋)
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● 在場址邊界, 側壁透出之直接 Gama 射線與從天井透出之天空射線總和在 $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 與核電廠內其他設施合計, 在場址邊界 $50 \mu\text{Sv/y}$ 以下 (理由: 考量從護箱內用過核燃料釋出的中子到達場址邊界, 與核電廠場址邊界放射線總量管理, 實際的有效放射線劑量(率)是以 Sv/y 單位來進行, 因此要求對設施總和有效放射線劑量(率)進行評估)

	基本安全機能(3/4)-密封機能
福島事件前	<ul style="list-style-type: none"> ● 密封 (shield) 性能為必要之洩漏率以下
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● 設計貯存期間, 用過核燃料等存空間須維持負壓
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 符合用過核燃料貯存設施之要求 (理由: 著重在確保基本安全機能之性能來進行規定)

	基本安全機能(4/4)-臨界防止機能
福島事件前	<ul style="list-style-type: none"> ● 任何狀況下 $K_{\text{eff}} \leq 0.95$
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● 任何狀況下防止臨界 ● 規定採用燃燒度指標 (burn-up credit)時之要求
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 符合用過核燃料貯存設施之要求 (理由: 著重在確保基本安全機能之性能來進行規定;為符合實際評估之需求, 導入採用燃燒度指標時之要求)

日本用過核子燃料貯設施之耐震安全設計要求從過去以來一直都是直接比照核反應爐設施 [2-7]。如圖 2-1，核反應爐緊急停止後從爐心去除崩壞熱之設施原本屬於 A 級，在福島事件後被改列入最高級、與 As 級合併成 S 級。也就是說，日本用過核燃料貯設施依耐震重要性可以分成 S, B 與 C 三類。用過核燃料貯系統等高放射性物料處理設備，去除崩壞熱，維持密封性與防止臨界相關設備，即列成最高 S 類。破壞對環境影響小者類為 B 類，其他為 C 類。



* A 類為具核能安全重要性之最高等級 (設計要求地震強度 3.0 倍)，

B 類為防災等級 (1.5 倍) 而 C 類則與一般建築要求相同 (1.0 倍)

圖 2-1 日本用過核燃料貯存設施之(原有)耐震安全分類 [2-5]

舊指針	新指針									
<p>設備依其耐震重要性分成四類後、合理的進行設計。設計時，依據重要性分類設定容許界限。</p> <div data-bbox="304 443 730 833" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 25%; border: 1px solid black; text-align: center; padding: 5px;">As</td> <td style="border: 1px solid black; text-align: center; padding: 5px;">A</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border: 1px solid black; text-align: center; padding: 5px;">B</td> </tr> <tr> <td colspan="2" style="border: 1px solid black; text-align: center; padding: 5px;">C</td> </tr> </table> </div> <p>As 類: 對設計基準地震 S2 維持安全機能、對設計基準地震 S1 維持彈性行為 A 類: 對設計基準地震 S1 維持彈性行為</p>	As	A	B		C		<p>耐震重要性最高由原本 As 類擴大至 A 類 (合稱 S 類)，改分成三類後設備之重要性分類與容許界限作重組。</p> <div data-bbox="863 443 1289 833" style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; text-align: center; padding: 5px;">S</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; text-align: center; padding: 5px;">B</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; text-align: center; padding: 5px;">C</td> </tr> </table> </div> <p>S 類: 對設計基準地震 Ss 維持安全機能、對設計基準地震 Sd 維持彈性行為</p>	S	B	C
As	A									
B										
C										
S										
B										
C										

圖 2-2 日本用過核燃料貯存設施之新舊指針耐震安全分類 [2-5]

根據設計規定，採用靜力析進行耐震設計時，若一般建築要求之地震強度為 1.0 倍，則 C 類 (一般等級) 同樣為 1.0 倍，B 類 (防災等級) 為 1.5 倍，而 S 類 (最高等級) 則為 3.0 倍 [2-5, 7]。採動力析時，S 類須對設計基準地震進行彈性分析，而 B 類且有共振疑慮者可用 1/2 強度之設計地震力進行彈性分析與設計檢核。如圖 2-2，核反應爐或貯存容器等在安全上有特別重要性之設施，其設計應確保其能承受將來可能發生之最大地震 (設計基準地震 S1)，與考量非現實

之極限地震（設計基準地震 S2）作用下仍可不喪失安全機能。

日本核能耐震設計標準在 2006 年曾進行修訂；修訂前設計基準地震分成 S1 與 S2 之 2 個強度，而修訂後改為 Ss 與 Sd 之 2 個強度，且彈性設計用地震強度 Sd 為設計基準地震強度 Ss 之 0.5 倍。設計地震力大小與場址有關，以福島第一核電廠為例，原設計依舊標準所訂地震強度 S1 為 180 gal，而 S2 為 270 gal（若考慮近斷層影響則增加為 370 gal），規範修訂後重新評估之設計基準地震 Ss 為 600 gal，而 2011 年福島事件中電廠實測值為 373 gal [2-8, 9]。對照圖 2-1 可知，用過核燃料貯存設施之設計地震強度應為一般建築之 3 倍、可抵抗 540 gal (=180 gal x 3)，故在福島事件中電廠實測 373 gal 之地震作用下、廠內用過核燃料貯存設施也如預期未發生任何結構損壞 [1-6]。

如圖 2-3，新指針對設計基準地震之決定流程有大幅度修正，進一步考慮更新世後期（距今約 13 萬年前）後曾活動的斷層，且設計基準地震之評估除根據個別場址可確定震源之地震，也新增要求考慮震源無法確定之內陸板塊間地震；內陸板塊間地震很難與特定的震源或活斷層作連結，故各個電廠除根據日本全國相關的地震紀錄資料進行評估，另外也在場址進行精密的三維地質結構調查來作評估，以確保設計基準地震可以適切地反映場址與周邊之地質結構（深層、淺層地底構造）對地震波傳播特性的影響 [2-5]。

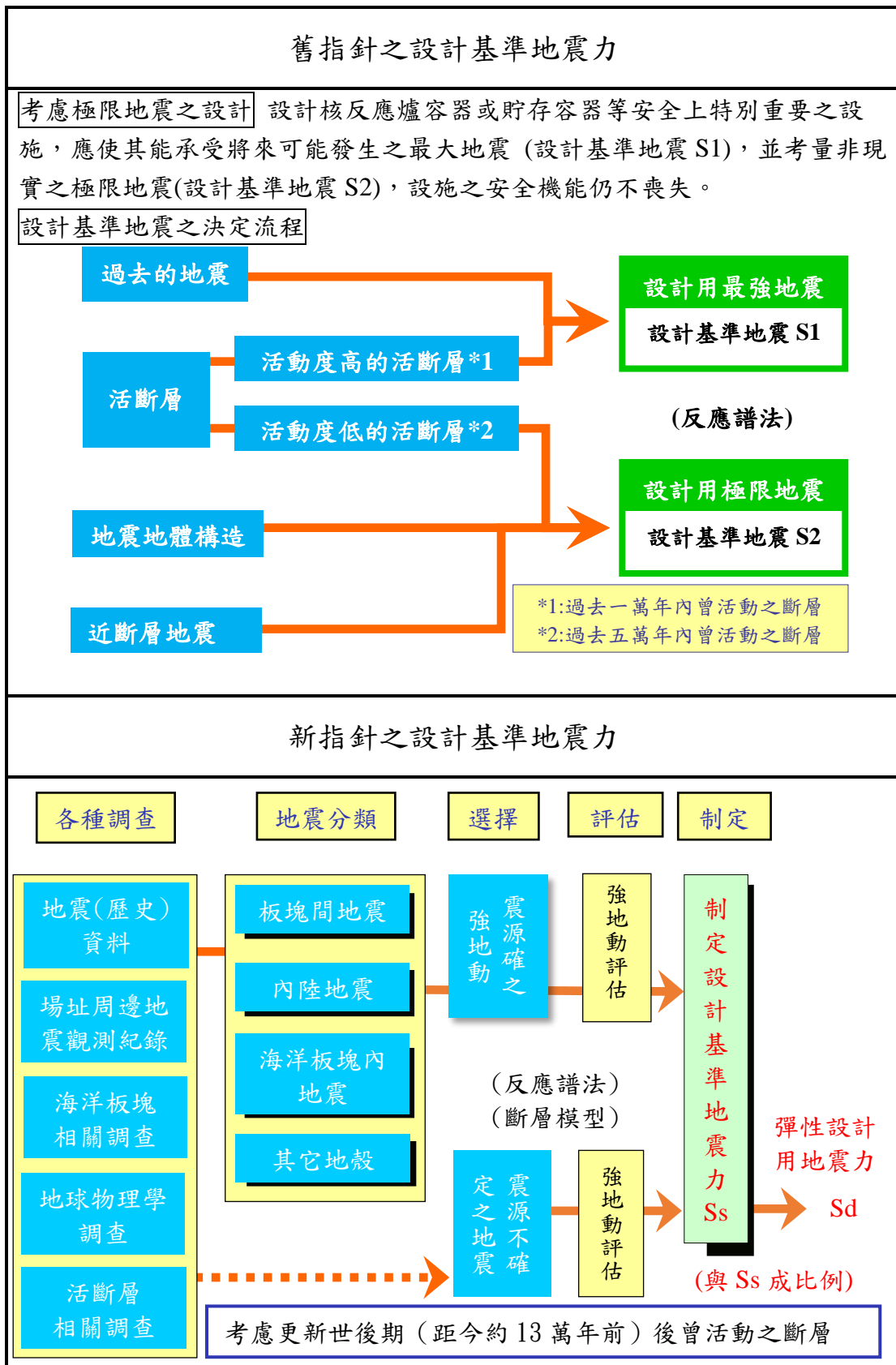


圖 2-3 日本核能設施新舊指針設計基準地震之比較 [2-5]

NRA 針對電廠核反應爐設施，在2013年6月頒布了“基準地震與耐震設計方法相關審查指針”[2-5]，並在同年7月 始實施。上述指針也作為其他核能相關設施在設計審查時之參考依據[2-6]。對應新的耐震重要分類與設計基準地震，日本用過核燃料貯存設施之護箱、建築物等設計基準，以及維持設施所需監視設備要求，進一步整理分析於表2-2與表2-3。用過核燃料貯存護箱具有輻防安全功能，故列入耐震設計要求最高之 S 類，而護箱所在貯存建築物如不需提供額外輻射防護，就列為 C 類、僅須確保在設計地震力下可維持基本安全機能。

表 2.2 日本用過核燃料貯存設施確保基本安全機能之設計基準[2-6]

	確保基本安全機能-護箱耐震性
福島事件前	<ul style="list-style-type: none"> ● S類
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● 對設計地震力Ss維持基本安全機能 ● 護箱非固定之情況下，必須分析確認設計地震力Ss下即使護箱傾倒也可以維持其基本安全機能
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 對設計地震力Ss，或運輸與貯存併用護箱貯存設施之非關場址特性地震力，維持基本安全機能 ● 非固定時，對設計地震力Ss要考慮傾倒等情況下仍須維持基本安全機能之要求符合用過核燃料貯存設施之要求 (理由: 增加運輸與貯存併用護箱貯存設施之非關場址特性地震力，以促使改為乾式護箱貯存) ● 進一步讓以下項目在指針中明確化 <ol style="list-style-type: none"> (1) 根據運輸與貯存併用護箱貯存設施用之非關場址特性地震力，進行靜力分析時應留意點 (2) 以傾倒為前提進行設計時，須符合以下要求 <ul style="list-style-type: none"> ■ 具密封機能部分維持在彈性範圍內 ■ 用過核燃料可再取出

	確保基本安全機能-建物耐震性
福島事件前	● C類 (對設計地震力Ss維持基本安全機能)
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● C類。但具有遮蔽壁或遮蔽機能之貯存建物為B類 ● 設置有貯存建物之情況下，要求對設計地震力 Ss 維持基本安全機能。但貯存建物受損時若能滿足以下條件，對設計地震力 Ss 可不要求維持基本安全機能。 <ul style="list-style-type: none"> (a) 不損害金屬護箱所具基本安全機能 (b) 適切之修復方式與修復期間，受損之貯存建物的遮蔽機能與除熱機能可以修復 (c) 修復期間，貯存設施周邊民眾不受放射線傷害影響。
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 不以設置遮蔽壁或貯存建物為前提。 ● 設置有貯存建物之情況下，對設計地震力 Ss，或運輸與貯存併用護箱貯存設施之非關場址特性地震力，要求維持基本安全機能。但貯存建物受損時若能滿足以下條件，對設計地震力 Ss 或運輸與貯存併用護箱貯存設施之非關場址特性地震力可不要求維持基本安全機能。 <ul style="list-style-type: none"> (a) 不損害金屬護箱所具基本安全機能 (b) 適切之修復方式與修復期間，受損之貯存建物的遮蔽機能可以修復 (c) 設計上考慮建物等損傷之情況下，包括修復期間，場址邊界民眾之實際有效輻射劑量限制1 mSv/y 以下。 <p>(理由：為恢復(a)所要求之除熱機能，在(b)僅要求恢復建物之遮蔽機能；在(c)具體記述實際有效輻射劑量限制值)</p>

	確保基本安全機能-固定支撐耐震性
福島事件前	● C類 (對設計地震力Ss維持基本安全機能)
福島事件後	(無相關規定)
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 符合用過核燃料貯存設施之要求 <p>(理由：只要能確保必要機能，非固定方式亦可接受、不特別作規定)</p>

	確保基本安全機能-自然現象及外部人為事件
福島事件前	● 安全評估中所應考慮之異常事件分為內部事件與外部事件，再依據對應之有效性、影響性與事件的涵蓋範圍進行選擇
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● 對設計基準海嘯，不可損及基本安全機能 ● 即使發生洪水、風災(颱風)、龍捲風、凍結、強降雨、積雪、雷擊、邊坡滑動、火山影響、遭受生化武器攻擊 (biological event)、森林火災等情況，不可損及基本安全機能 ● 人為事件與場址與場址周邊之狀況有關，例如飛來物 (飛機墜

	落等)、水庫之崩壞、爆炸、附近工廠等之火災、毒氣、船舶衝突、與電磁波障礙等，不可損及基本安全機能
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 符合用過核燃料貯存設施之要求 (理由: 關於自然現象等更具體地規定) ● 進一步讓以下項目在指針中明確化 <ul style="list-style-type: none"> ■ 根據設計基準海嘯作用力或漂流物衝擊力，設定外力。或者，設計配置使護箱不直接受基準海嘯作用力或漂流物衝擊力所影響。

	確保基本安全機能-結構健全性
福島事件前	<ul style="list-style-type: none"> ● 提供護箱結構強度之材料應考慮最低使用溫度之低溫脆性，與設計貯存期間放射線照射影響、腐蝕、潛變、疲勞、應力腐蝕劣化等長年期變化，選擇具有良好信賴性之材料。
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● 對於設計貯存期間之溫度、放射線等環境與如此環境下之腐蝕潛變、疲勞、應力腐蝕劣化等長年期變化，選擇具有良好信賴性之材料，設計須維持其必要之強度、性能，以不損及必要之安全機能。
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 符合用過核燃料貯存設施之要求 (理由: 除了材料選擇，要求包含強度、性能在內之結構健全性) ● 進一步讓以下項目在指針中更明確 <ul style="list-style-type: none"> ■ 要求評估戶外保管時之留意點 (雨水滲入等)

表 2.3 日本用過核燃料貯存設施維持基本安全機能之設計基準[2-6]

	維持基本安全機能-監視機能
福島事件前	<ul style="list-style-type: none"> ● 連續監視
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● 適切地監視 (連續監視與記錄護箱之表面溫度與蓋間壓力為法定義務)
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 適切地監視、不要求連續監視 (理由: 即使不進行連續監視，也可能在洩漏達異常量前檢測發覺)

如表2-4所示，福島事件後防災重點進一步要求對設計基準海嘯，不可損及貯存設施之基本安全機能。即使發生洪水、風災(颱風)、龍捲風、凍結、強降雨、積雪、雷擊、邊坡滑動、火山影響、遭受生化

武器攻擊 (biological event)、森林火災等情況，也要求不可損及基本安全機能。與場址周邊狀況有關人為事件，如飛來物（飛機墜落等）、水庫崩壞、爆炸、附近工廠之火災、毒氣、船舶衝突、與電磁波障礙也列入考量。

表 2.4 日本用過核燃料貯存設施防災重點要求之設計基準[2-6]

防災重點要求-安全評估	
福島事件前	<ul style="list-style-type: none"> ● 規定安全評估時異常事件之選擇的考慮方式與4個基本安全機能之評估基準 ● 除熱: 為不防礙密封、遮蔽與臨界防止，各部分之溫度控制在溫度限制以下 ● 密封: 護箱本體、一次蓋未破損、一次蓋鎖固螺栓、與密封封口面不產生塑性變形，金屬墊片 (gasket) 維持密封健全性 ● 遮蔽: 距表面 1 m 處控制在 10 mSv/h 以下 ● 臨界防止: 考慮墊片 (gasket)、用過核燃料等形狀變化，$K_{eff} \leq 0.95$
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● 從 (1) 設施內運輸過程操作錯誤導致金屬護箱之衝突、掉落，與 (2) 自然災害等考慮，也根據長年期變化，決定設計最大考量事件，發生事件時民眾輻射暴露量評估值要求控制在 5 mSv 以下
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 符合用過核燃料貯存設施之要求。但設計上已考慮護箱傾倒或建物損傷之情況，可為上述安全評估除外對象。 (理由: 不是根據個別的基本安全機能每個作要求，而是全體輻射劑量來限量控制)

防災重點要求-大規模損壞	
福島事件前	<ul style="list-style-type: none"> ● (無相關規定)
福島事件後	<ul style="list-style-type: none"> ● (無相關規定)
未來修訂方向	<ul style="list-style-type: none"> ● 重大事故時技術能力審查基準之飛機衝突等，要求整備大規模損壞時護箱冷卻順序、體制、訓練等，與放水等引致之滅火活動以及適切地除熱。

防災重點要求-護箱傾倒時燃料健全性評估	
福島事件前	● (無相關規定)
福島事件後	● (無相關規定)
未來修訂方向	● 適切地整備護箱傾倒後應對體制，且適切地表現整備之方針 (理由: 護箱傾倒後燃料被覆管可能損傷之情況，要求整備能適切地對應之體制)

第三章 日本青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施設計 審查案例研究

3.1 案例研究對象

如表3-1所示，本計畫以日本青森縣陸奧市用過核燃料中期貯存設施 [3-1] 為對象，進行案例研究與分析。

表3-1 用過核燃料中間貯存設施建設計畫概要

位置	青森縣陸奧市大字關根字水川目地內
面積	26 萬平方公尺 (主體設施用地)
業主	RFS 股份有限公司
貯存容量	用過核燃料 5,000 噸 (第一棟建築物3,000噸); 每年分4次將200-300噸用過核燃料搬入設施
貯存方式	金屬護箱乾式貯存系統
使用時間	每個乾貯設施/金屬護箱最長使用時間為50年; 協議在營業40年到期前貯存的用過核燃料搬出

資料來源: 青森縣政府網頁資料

< <https://www.pref.aomori.lg.jp/sangyo/energy/0001tyuukan.html> >

日本大多數核電廠產生之用過核燃料在廠內冷卻池貯存一段時間後，計畫送往青森六ヶ所 (Rokkasho) 再處理設施，但上述設

施之啟用因故再三延期 [3-2, 3]。東京電力與日本原子力發電合資另外在青森縣陸奧（むつ Mutsu）市成立公司，並申請建造用過核燃料集中貯存設施。

3.2 事業許可申請審查

如表 3-2，東京電力公司在 2001 年 4 月進行工址可行性調查。

表 3-2 設施用地請求審查

日期	大事記要
2000 年 6 月	「核反應爐等管制法」之部分修訂（使核能發電廠外用過核子燃料貯存變可能）
2000 年 11 月	陸奧（むつ mutsu）市提出「回收燃料貯存中心（リサイクル燃料備蓄センター）」工址相關技術調查之要求。
2000 年 12 月	東京電力公司依要求進行「回收燃料貯存中心」工址可行性調查。
2001 年 1 月	日本原子力研究所（Japan Atomic Energy Agency，JAEA）開始對關根浜港周邊地域進行文獻調查。陸奧市內開設調查所。
2001 年 4 月	開始現地調查。
2003 年 4 月	向陸奧市，提出工址可行性調查報告。 (東京電力)公布事業構想。
2003 年 6 月	陸奧市長在議會表明，招攬「回收燃料貯存中心」用過核燃料貯存事業。
2003 年 7 月	陸奧市長收到用地請求。
2004 年 2 月	對青森縣與陸奧市，提出用地請求（公佈事業概要）。
2005 年 10 月	青森縣與陸奧市同意用地請求。 青森縣，陸奧市，東京電力與日本原子力發電簽署「用過核子燃料中間貯存設施相關合作協議」。

資料來源: RFS 公司簡史<<http://www.rfsc.co.jp/company/history.html>>

東京電力公司接著在 2003 年 2 月對青森縣與陸奧市提出設施用地請求。經過 2004 年 1 月專家安全會議檢討 (包括:計畫, 用地, 乾貯設施安全性, 平常與意外安全評估, 運輸安全, 與品保等), 陸奧市長確認安全性評估結果。

青森縣政府對於用地請求, 透過縣議會、各市鎮村長、青森縣核能政策懇談會與縣民說明會, 在「用過核燃料中間貯存設施相關意見公聽會」中徵詢各方意見後, 青森縣, 陸奧市, 東京電力與日本原子力發電才在 2005 年 10 月簽署「用過核子燃料中間貯存設施相關合作協議」 [3-4]。

如表 3-3, 東京電力與日本原子力發電在 2005 年 11 月共同出資, 在陸奧市成立「回收燃料貯存股份有限公司 (リサイクル燃料貯蔵株式会社, Recycle Fuel Storage (RFS) company)」。RFS 公司在 2007 年 3 月向日本經濟產業大臣提出事業許可申請, 經審查在 2010 年 5 月獲准、2010 年 8 月開始建設第一棟建築物。建築物長約 130 m, 寬約 60 m, 而高度約為 30 m, 預估工期為 3 年, 而總經費為 1,000 億日圓, 其中金屬護箱佔 7-8 成, 設施完工後可貯存之用過核燃料為 3,000 噸。如表 3-4, 工程建設雖受 311 事件影響而一度中斷, 但最後工期仍如預估為 3 年、並已在 2013 年 8 月完工。

表 3-3 事業許可申請審查

日期	大事記要
2005 年 11 月 21 日	東京電力與日本原子力發電共同出資，在陸奧市成立「回收燃料貯存公司 (Recycle Fuel Storage (RFS) company)」。
2005 年 11 月 24 日	為取得設施設計與事業許可申請所需資料，RFS 公司開始進行詳細調查。
2007 年 3 月 22 日	向日本經濟產業大臣，提出「回收燃料貯存中心」用過核燃料貯存事業許可申請書。
2008 年 3 月 24 日	「回收燃料貯存中心」建設預備工程開工。
2009 年 4 月 7 日	向日本經濟產業大臣，提出「回收燃料貯存中心」用過核燃料貯存事業許可申請修正報告。
2009 年 6 月 30 日	向經濟產業大臣，提出事業許可申請修正報告(第二次)。
2009 年 8 月 27 日	向經濟產業大臣，提出事業許可申請修正報告(第三次)。
2009 年 12 月 2 日	向經濟產業大臣，RFS 公司提出事業許可申請修正報告(第四次)。
2009 年 12 月 22 日	事業許可申請送交日本原子力安全・保安院 (Nuclear and Industrial Safety Agency, NISA)，原子力委員會 (Atomic Energy Commission, AEC)，與原子力安全委員會 (Nuclear Safety Commission, NSC) 進行詢答 (二次審查)。
2010 年 4 月 9 日	向經濟產業大臣，提出事業許可申請修正報告(第五次)。
2010 年 4 月 19 日	針對事業許可申請，原子力安全委員會 (NSC) 向經濟產業大臣提出報告。
2010 年 4 月 20 日	針對事業許可申請，原子力委員會 (AEC) 向經濟產業大臣提出報告。
2010 年 5 月 13 日	「回收燃料貯存中心」用過核燃料貯存事業許可申請獲准。
2010 年 6 月 16 日	提出「用過核燃料貯存設施設計與施工方法之認可申請書」。
2010 年 8 月 27 日	設計與施工方法獲准。
2010 年 8 月 31 日	用過核燃料貯存設施開工。

資料來源: RFS 公司簡史<<http://www.rfsc.co.jp/company/history.html>>

表 3-4 新規制適法性審查

日期	大事記要
2011 年 3 月 11 日	因東日本大震災，建設工程中斷。
2012 年 1 月 30 日	向經濟產業大臣，提出「回收燃料貯存中心」施工計畫變更申請報告。
2012 年 3 月	貯存建築物復工。
2013 年 8 月 29 日	貯存建築物完工（第一棟：貯存用過核燃料 3,000 噸）。
2013 年 11 月 5 日	向原子力規制委員會（Nuclear Regulation Authority, NRA），提出「回收燃料貯存中心」工程計畫變更報告（設施啟用時間改為未定）。
2014 年 1 月 15 日	向原子力規制委員會（NRA），為適用新規制基準提出「回收燃料貯存中心」事業變更許可申請書（連同工程計畫變更；設施啟用時間改為 2015 年 3 月）。
2015 年 1 月 30 日	向原子力規制委員會（NRA），提出「回收燃料貯存中心」事業變更許可申請書之部分修正（工程計畫變更；設施啟用時間改為 2016 年 10 月）。
2016 年 9 月 16 日	向原子力規制委員會（NRA），提出「回收燃料貯存中心」事業變更許可申請書之部分修正（工程計畫變更；設施啟用時間變改為 2018 年後半）。
2018 年 1 月 30 日	向原子力規制委員會（NRA），提出以 2018 年 4 月開始至 2021 年為期 3 年之用過核燃料貯存計畫。

資料來源: RFS 公司新聞 < <http://www.rfsc.co.jp/press/index.html> >

3.3 新規制適法性審查

如表 3-4 所示，RFS 公司在 2014 年 1 月向原子力規制委員會 (NRA) 提出用過核燃料貯存設施之新規制適法性確認審查，同時提交用過核燃料貯存事業之變更許可申請書，貯存計畫變更報告，與使用前檢查申請書相關變更報告，並在 NRA 網頁公開、供審查與公聽

會參考 [3-5, 6]。

NRA 審查會議由一般旁聽與網路轉播來公開，而資料也原則上公開（依日本情報公開法第五條不得公開之情報除外）。另外，對於民航機等恐怖攻擊與對策之審查，依 2013年12月18日NRA會議決議事項辦理。審查依需要安排現地訪查。公聽會 (hearing) 詢答記錄會公開，而資料也原則上公開。業者對會議紀錄有異議時可在期限內提出。

從 RFS 公司2014年送件申請到1月15日2016年2月10日中間報告為止，為確認用過核燃料貯存設施對新規制之適法性，總共進行了104次審查會議。配合審查，在2016年6月17日與8月4日進行了2次現地調查。第一次由原子力規制廳安全規制管理部門（廢棄物，貯存與運輸）負責，針對 RFS 公司過核燃料貯存設施進行訪查。第二次由原子力規制廳地震與海嘯安全對策部門負責，針對RFS公司過核燃料貯存設施與工址周邊進行訪查。

上述審查會議中設施相關的有85次，而RFS公司在會中即依序說明「基本安全機能」，「龍捲風」，「外部火災」，與「設計最大考量事故」等課題，同時對收到的意見與問題（460個）、有96%已完成答覆，而仍待說明的有「龍捲風對設施影響之評估」課題。地震與海嘯等相關的19次審查會議中，說明完成的有「地下構造之評估」，「工址之地質、地質構造」，「工址周邊之活斷層評估」，「個別工

址特定震源之地震動」，與「基準的海嘯與火山影響評估」等課題，而仍待說明的有「震源無法特定之地震動」，「基準地震動」，與「地盤、坡面的安定性」等課題。

今年 2018 年 2 月 23 日的審查會議中，針對用過核燃料貯存設施之基礎地盤與周邊斜坡的安定性評估，RFS 公司完成了相關課題之說明。最近一次在 2018 年 6 月 26 日舉辦的公聽會中，針對民眾事前提問 (1) 非放射性廢棄物之廢棄物的管理，與 (2) 收到的金屬護箱之確認，以及應官方要求說明保安規定第十七條之檢查項目「溫度測定檢查」的定位，RFS 公司進行答覆。在 2018 年 6 月 29 日舉辦的審查會議中，針對前次 4 月會議中海嘯防護方針中還未解決的「水深係數設定」，RFS 公司提出相關的文獻資料與詳細的模擬分析作為佐證，以說明評估之依據與分析具妥當性。

3.4 審查要項與管制建議

如表 3-5，2018 年 11 月 30 日的審查會議後，RFS 公司已經確認完成設計基準地震相關調查，下一階段將開始用過核燃料貯存設施耐震設計之實質審查 [3-7]。

表 3-5 RFS 用過核燃料貯存設施之審查進度 [3-7]

審查要項	已審查確認之內容
設施相關	<ul style="list-style-type: none"> ● 設計基準相關 (臨界防止, 遮蔽, 密封與除熱等「基本安全機能」; 火災與龍捲風等「損傷防止」) ● 耐震設計基本方針 ● 海嘯評估方針中的海嘯防護對策 (漂流物影響, 浸水影響, 與浸水對策)
地震相關	<ul style="list-style-type: none"> ● 火山影響評估 ● 地質、地質結構 ● 地震動, 基準地震動, 基準地震動之年超越機率, 基礎地盤與周邊斜坡之穩定性評估 ● 海嘯評估方針中, 假想的大規模海嘯之設定

根據案例設施之設計審查資料, 針對 (1)火山, (2)海嘯, 與 (3)地震, 活斷層與邊坡穩定相關安全評估內容與要求, 進一步說明如下:

(1) 火山

恐山是設施影響範圍內之火山, 而 RFS 公司藉由地球物理調查, 也就是利用地震波傳播速度來解析地下三維結構, 進行影響評估 [3-7]。上述地震波速分析結果顯示, 深度 20 km 到 40 km 間有熔岩存在, 而與電磁波探測結果彙整後確認, 深度 20 km 以內淺層區應無大規模

熔岩存在。另外根據活動履歷，地質調查與火山學，綜合判斷恐山雖仍有地下熱水與火山瓦斯之流動，但伴隨熔岩噴發而產生的火山碎屑沉降物應不影響附近的用過核燃料貯存設施。

(2) 海嘯

電廠營運期內，可能影響核能安全設施之海嘯，即設計基準海嘯 [3-8]。新規範要求除了地震，也要考慮其他造成海嘯的原因，如陸地或海底之地層滑動，坡面破壞，火山（噴發，山崩與熔岩塌陷等），來評估設計基準海嘯與影響。另外，以最小網格間距 5 m 來要求模擬分析精度。審查要項包括：海嘯評估原則，建物完整性評估，浸水影響評估與安全機能確認等。RFS 公司是以更高之標準，對於假想的大規模海嘯，也就是青森縣歷史紀錄之 2 倍，進行三維模型水壓分析，並考慮地形，設施周邊建物，海水密度，網格設定與亂流模型等因素，評估海嘯浸水之影響 [3-9]。

(3) 地震,活斷層與邊坡穩定

如前章所述，福島地震後新增要求考慮不特定震源之內陸板塊地震，加上 2011 年日本東北地方東太平洋地震 ($M_w=9.0$) 之影響，必須調整設計基準地震 S_s (600 gal) 之延時 (duration)。RFS 公司對場址 30 km 以內影響範圍進行更詳細的地質調查，以根據結果修正地震模型

中的活斷層參數，修正的設計基準地震之年超越機率介於 10^{-4} ~ 10^{-5} 間。

伴隨著設計基準地震之修正，基礎地盤必須重新評估地震下滑移量，支撐能力，與傾斜量等，並確認均在設計容許範圍內。

第四章 國際間室內乾式貯存設施耐震設計及意外事故評估方法研析

4.1 乾貯設施特性與安全設計考量

設計乾貯護箱系統時，針對墜落 (drop) 或翻倒 (tip-over) 等假想的意外情境，會進行評估。根據分析研究 [4-1]，上述意外所造成的反向加速度效果 (deceleration effects) 約重力加速度 (g) 之 40 到 60 倍，而地震造成的結構反應加速度則為重力加速度 (g) 之 1 到 2 倍。護箱系統很粗壯 (rugged)，通常具有很高的自然頻率。因此，假想的墜落 (drop) 或翻倒 (tip-over) 等意外比地震更可能在護箱造成嚴重損害。乾貯護箱系統之受震反應為運輸意外反應所包絡，故可根據意外分析結果進行結構耐震再評估。

受1994年美國北嶺地震與1995年日本神戶地震之影響，國際原能組織 (IAEA) 曾針對乾式貯存設施在內之核燃料回收設施 (nuclear fuel cycle facilities) 之耐震性設計考量與再評估方法，進行檢討。根據 IAEA 在2001年出版之專書[4-2]，核燃料貯存設施進行耐震設計或再評估時，應考量其有別於核能電廠之以下特性：

- (1) 較低之操作溫度與壓力
- (2) 一般與異常事件之臨界危害性 (criticality hazard)

- (3) 因土木結構形狀不規則所需額外考慮之扭轉效應
- (4) 一般與地震等異常事件下要求之高度密封性 (high degree of confinement)
- (5) 為控制輻射擴散所採取之多重圍束或屏蔽措施
- (6) 重型結構 (heavy structures) 之遮蔽考量
- (7) 在有毒輻射環境下腐蝕、侵蝕與劣化之相關問題
- (8) 長期維修時間計畫
- (9) 操作時化學與火災危害性 (工業危害)
- (10) 構件配置特別考慮未來維修與替換策略
- (11) 輻射庫存相關耗能低
- (12) 長期設備操作性與結構完整性，保持被動但安全貯存或密封
(例如貯存容器、貯液槽)之重要性
- (13) 作為屏蔽設施之一部分，通風系統 (ventilation systems) 之重要性

地震後災害調查發現，核燃料貯存設施跟化學工廠有以下的共通點：

- (1) 火災之發生與擴散
- (2) 管線系統 (電力，瓦斯，供水，下水道，資訊網路與溝通系統)
失效之影響
- (3) 火災與房屋倒塌所致人命損失

(4) 管線與貯存容器之破壞

(5) 緊急應變措施 (消防, 交管與資通部門)

另一個調查發現是，核燃料貯存設施都安然地渡過前述兩個大地震、沒有任何結構損傷。

在 2011 年日本福島事件衝擊下，經濟合作暨發展組織核能署 (OECD/NEA) 下核設施安全委員會 (Committee on the Safety of Nuclear Installations, CSNI) 在 2013 年 5 月與德國非營利組織 (Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit, GRS) 共同主辦“長期中期貯存設施安全”國際研討會 [4-3]。會中，國際原能組織 (IAEA) 下跨國工作小組針對兩用護箱 (Dual Purpose Casks, DPC) 綜合其運輸與貯存安全情況，說明其技術指針已考慮安全論證之諸多層面，包括確保運輸期間安全，與假設貯存期後護箱無法開啟，而現存的困難點有 (1) 貯存與運輸兩者核照過程之差異，(2) 兩用護箱 (DPC) 之劣化，與 (3) 技術發展等，最後建議 IAEA 既有技術文件進行相關更新。

為了用過核燃料之長期貯存與運輸，發展與執行安全規範與立法架構時，遭遇的問題點還有 (1) 傳統核照方法不考慮長期貯存，(2) (為運輸或繼續貯存) 重新包裝用過核燃料之困難，(3) 最終處置具多種可能性 (包括處置媒介，地質處置，與用過核燃料包裝等)，(4) 更

高燃耗對再取出之影響，與(5) 缺乏系統性的劣化管理計畫。

上述國際會議最後作成以下建議:

- (1) 中期貯存時期應蒐集最終處置安全條件相關資訊。
- (2) 紀錄之保存與知識管理是長期貯存之重要課題。
- (3) 不要把未解決之問題留給未來的世代。
- (4) 針對用過核燃料與高放射性廢棄物，因其最終處置方案延遲，必須發展很長時間中期貯存之概念。
- (5) 特別強調，有必要發展週期性安全評估與劣化管理計畫。

4.2 德國室內乾貯與安全管制

4.2.1 德國乾貯設施發展背景

隨著能源政策之改變，德國政府在 2001 正式簽屬法規，宣布國內放射性廢棄物之處置僅限於直接最終處置，而 2005 年起禁止用過核燃料運到法國與英國之再處理工廠，以期 2030 年前達成開始地質處置之目標；德國政府與核能電廠業者雙方因此達成協議，盡速在電廠內或附近建置用過核燃料中期貯存設施，且廠內乾貯設施在5年內必須開始營運 [4-4]。

從1998年到2000年底，德國5個聯邦州13個電廠提出18個廠內中期貯存設施之申請，包括12個貯存建築物 (storage buildings)，1個貯存坑道 (storage tunnel)，與5個貯存區域 (storage areas)。上述13個電

廠之一在2001年申請除役、取消廠內中期乾貯設施之申請。貯存建築物之設計概念有兩種，由Wissenschaftlich-Technische Ingenieurberatung GmbH 與 STEAG encotec GmbH 兩家工程顧問公司分別發展與提出(以下簡稱為 WIT概念 與 STEAG概念)。貯存坑道之概念是因應 Neckarwestheim 之特殊場址所發展出來的。貯存區域則是為了廠內中期貯存設施正式運轉前5年之過渡時期。

4.2.2 耐震設計與意外事故之評估要求

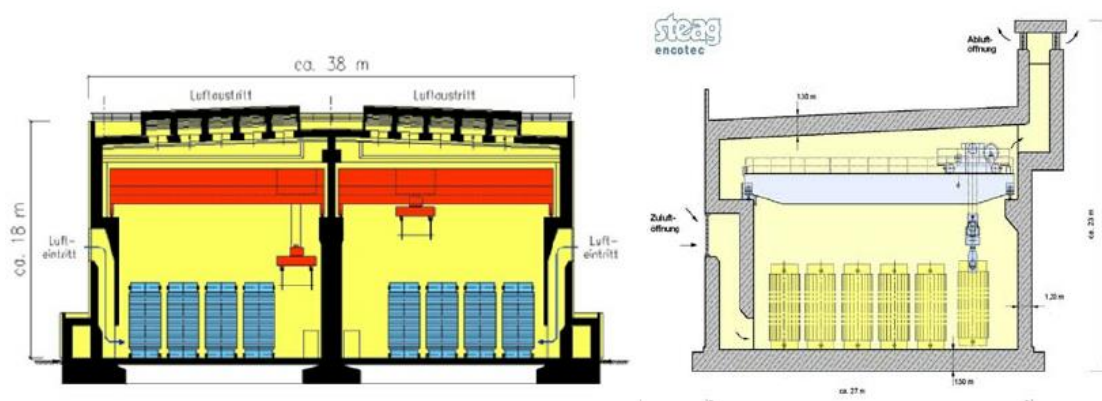


圖 4-1 德國室內乾貯設施之 WIT 概念與 STEAG 概念 [4-4]

如圖所示，WIT 概念採用壁式混凝土結構，牆壁厚度 0.7m 或 0.85 m，屋頂厚度約 0.55 m，為以一牆分出兩廳室空間之建築。WIT 概念已用於德國南部 Biblis, Philippsburg, Grafenrheinfeld, Isar 與 Gundremmingen 之 5 個場址。依 WIT 概念設計之貯存建築物距今已使用超過 30 年，多年經驗已促使在技術與經濟上作最佳化。

STEAG 概念也是採用壁式混凝土結構，牆壁厚度約 1.2 m，屋

頂厚度約1.3 m，為單一廳室空間之建築。STEAG 概念已用於德國北部 Brokdorf，Krümmel，Brunsbüttel，Grohnde，Lingen 與 Unterweser 之6個場址。STEAG 概念是為使用未來、可能較便宜之護箱所發展的。今日，運輸與貯存兩用護箱應已可確保飛機攻擊之安全性，但電廠業者仍然計畫將 STEAG 概念之厚壁混凝土結構納入未來護箱設計中。對應核子工程多重屏障概念 (multiple barrier principle)，強化之建築結構應可作為額外的屏障。在既存的集中貯存設施，已可藉由場址內貯存設施與貯存區域來控制壓力與緊固貯存護箱。從核照與安全之觀點，分散式 (decentralized) 與集中式 (centralized) 中期貯存設施之要求並無不同，然而，與核能電廠周邊可能之互動需另外檢討與確認。

德國乾貯設施之安全設計與要求包括：

(1) 除熱

所有乾貯設施都設計成護箱可藉由空氣自然對流來除熱。冷空氣由建築物側面進入，流經護箱後從屋頂釋出。藉由自然對流除熱而即使在意外情況下仍不需主動通風系統，也不需人員介入。如 Neckarwestheim 核能電廠 (GKN) 之特殊場址，利用地形特性使用坑道貯存，藉由從岩石坑道到表面間自然對流進行除熱。

(2) 遮蔽

考慮貯存建築物之混凝土厚壁，或坑道周邊岩石，與厚壁護箱設

計，貯存建築物外輻射劑量已有效降低到可接受之程度，場址內工程人員或外面民眾不需採取其他特別的防護措施。至於護箱，須使建築物內之輻射劑量降低，以允許護箱之移入，搬運與操作等工作在必要時進行。

(3) 次臨界 (Subcriticality)

為次臨界之保安，考慮意外之可能影響。乾貯的情形，也就是護箱內可分裂材料重新定位，被排除於護箱與用過核燃料提籃之設計。

(4) 安全密閉 (Safe enclosure)

德國用過核燃料與高放射性廢棄物之政策，最優先考慮對設計基準意外與超過設計基準意外之安全性。一方面考慮火災，地震，洪水，坡地滑動，雷擊或飛機衝突等外部危害度。另一方面重視如操作錯誤或護箱掉落等內部意外。護箱與貯存建築物提供保護給封裝活動，確保符合相關安全要求。甚至在超越設計基準意外(例如飛機衝突)，建築物即使倒塌，護箱維持完整且無輻射外洩之虞。上述高標準之安全性是建立在使用之被動安全系統，與護箱與貯存建築物之匹配組合。即使是福島事件中，裝有放過核燃料之貯存護箱也未受地震與海嘯所嚴重影響。然而，核電廠內燃料池因為必須依賴主動冷卻系統，引發很多問題與在冷卻系統破

壞後發生輻射外釋問題。藉由厚壁雙層封銲兩用護箱系統，正常操作與嚴重意外且無主動冷卻系統之狀況下，貯存之密封性都可被維持。

如果護箱需要維修，例如作為屏障之雙層封銲系統失敗時，護箱可以在電廠內卸載，或者雙層封銲可以再加第三層封銲來銲接修復護箱系統。

4.2.3 乾貯管制現況與未來展望

德國最終處置前用過核燃料中期貯存之政策概念，係以貯存用建築物內之（金屬）護箱，來對用過燃料（SF）與高階放射性廢棄物（HLW）進行乾式貯存 [4-5]。核照程序包括貯存執照（storage license）與包件許可（package approval）之申請，而後者最重要要求之一為護箱在貯存期間任何時候都必須是可移動的（transportable）。2012年版護箱乾式貯存安全需求指針確立了，(1) 以護箱，燃料基質（fuel matrix），與護套（cladding tubes）作為放射性物質防護之手段，(2) 以維持用過核燃料結構完整性來確保主要安全機能，作為用過核燃料安全要求之前提。十年安全再評估（periodic safety review, PSR）指針在2010年11月頒布，在法規強制執行前即已在選定的 Gorleben 與 Lingen 兩個廠區設施先行測試。

一般認為，德國目前乾貯法規管制仍須改進，因為十年安全再

評估 (PSR) 作業並非不具強制性，且對於劣化 (aging) 問題也只有
一般性規範。研擬中的法規草案將涵蓋所有類型的貯存設施與有系
統的劣化管理計畫，而知識管理與人員計畫等非技術類 "劣化" 問
題也將納入考量。針對延長貯存，劣化相關資訊是設施安全驗證的
重要依據與憑藉。業界 TÜV 集團意見也同樣強調知識與資料管理
對乾貯延長貯存之重要性。管制機關 BFS 則認為，在變動環境下延
長貯存在法規制定上有一定之挑戰，一方面最終處置實施前後衝擊
在所難免，另一方面數位化對資料保存完整性也帶來影響，未來則
需仰賴專業人員之經驗，乾貯期間所蒐集到的最終處置安全資訊，
以解決人事與立法之問題。

4.3 英國室內乾貯與安全管制

4.3.1 Sizewell B 核能電廠室內乾貯

Sizewell B 核能電廠室內乾貯是英國第一個乾貯設施。英國 EdF
energy 公司與美國 Holtec International 公司進行技術合作，在2017
年3月13日將第一個裝有用過核燃料之 HI-STORM MIC 乾貯護箱系
統，成功地放置於 Sizewell B 核能電廠之乾貯建築物中 [4-6]。使用
之HI-STORM 護箱系統原本是用於戶外貯存的，但 EDF energy 公司
決定在電廠內建造一個建築物存放護箱系統、進行室內貯存。上述乾
貯設施在 2012 年向英國核能管制機關 (Office for Nuclear

Regulation, ONR) 申照獲准，而貯存用建築物在 2014年 通過審查。

4.3.2 耐震設計與意外事故之評估要求

上述室內貯存建築物之設計審查分成三個部分，除了輻射防護，還有結構安全與通風機能 [4-7]。結構審查重點在於確認混凝土樓板設計之適當性，因為樓板必須支撐其上用過核燃料貯存容器，具有核能安全功能。具體而言，混凝土樓板之承壓能力 (bearing capacities)，比起燃料貯存容器或容器搬運設備所致載重，必須保有適當之餘裕。結構設計也確認護箱掉落對混凝土樓板僅造成局部損傷，而為減緩護箱從 5.4 m 高之轉運設備掉落之風險與影響，設備基座加裝了吸能減震系統。

耐震設計必須考量經常 (frequent) 與罕見 (infrequent) 地震事件，並且分析確認樓板之結構強度足以承受，而對於超越設計地震、即日本福島地震，則藉壓力測試來確認樓板之結構設計仍具有適當之餘裕。設計必須適當地考量地震所致土壤液化，以及地下水與洪水所致土石流失之影響，另外考慮飛機衝擊後發生火災之影響，分析確認混凝土樓板仍具完整性，且護箱外部損傷有限而內部貯存核燃料無損傷、即未超過材料破壞之臨界溫度。

至於包覆整個樓板與建築空間之輕量蓋板上部結構 (lightweight clad superstructure)，是用來降低環境影響、不具核能安全功能，但考

量海洋環境之影響只作出耐候性要求。上述遮蔽結構之崩塌經分析確認，對混凝土樓板與護箱外部僅造成表面輕微損傷，不影響護箱內用過核燃料之貯存與密封性。整體建築設計另外經分析確認不影響室內通風與護箱氣冷功能，故無加裝設備之需要。

4.3.3 設施啟用前安全審查與管制要求

依核照要求，英國核能主管機關 ONR 對 Sizewell B 核能電廠內乾貯設施進行啟用前評估與檢查 [4-8]，具體內容包括：(1) 檢視業者所發展之乾貯安全功能 (Dry Fuel Store Safety Case)，以及啟用設備與操作方法符合設計與安全之功能要求，且程序可靠；(2) 從設計決定、測試、與運轉，乃至專案安全覆審，確保各個專家審查作業過程之有效性，以落實乾貯專案管理；(3) 確認啟用前測試與操作報告文件已完成，以及技術面未合格之問題已對應處理；(4) 確認人員之操作訓練，操作指示必須達到適當的標準，符合事前定義之安全限制與條件；(5) 確認乾貯設施正式啟用所需之人員組織與督導單位都已就定位。

英國核能管制機關 (ONR) 在2017年頒布保安評估準則 (Security Assessment Principles, SyAPs)，以對電廠保安與核能設施相關敏感資訊進行管控 [4-9]。安全計畫包含開發商、持有執照者或設施所有者所提出之整體文件，也就是場址保安計畫，運輸保安計畫，運輸安全聲明 (Transport Security Statements, TSSs) 與向主管機關 ONR 所提

出之部分文書檔案等，以證明設施具高標準核子安全。根據上述準則，防護系統應基於設計基礎威脅 (Design Basis Threat, DBT) 進行設計，評估與測試，以確認可達到預設之保安效果。所謂 DBT，即潛在的內部者 (即有權進入設施或參與運輸之人員) 或敵對陣營，未經授權進行設施移除、破壞核能土木設施，所致威脅。在英國，DBT對核子土木設施之破壞能力，乃至恐怖分子之組成與破壞能力，以及其他潛在威脅等假設，另外由 DBEIS (Department for Business Energy and Industrial Strategy) 部門頒定之 NIMCA (Nuclear Industries Malicious Capabilities Planning Assumptions) 文件作說明。緊急準備應變 (Emergency Preparedness and Response, EP&R) 工作應考慮超越 DBT 之嚴重保安事件，並確保支援單位充分瞭解與參與。此外，保安計畫應顧及長期持續事故，包括局部設施之嚴重破壞。具有複數設施之場址，保安計畫應說明相關資源在場址內如何共享。

英國·鈾拉法 (Sellafield) 是一個有很多類型核能設施之場址，其設施除役與清理由官方控股公司 Sellafield Ltd. 負責，該公司曾就中期貯存設施之長時間安全性，介紹分析技術如何用於輔助設施之設計、運轉、恢復力評估 (resilience evaluation) 與意外管理 [4-10]。另外從福島事件經驗所進行之案例分析研究，獲得重要的結論之一即為緊急情況下人員只能遵循簡單的指示、而非鉅量之技術文件。

4.4 日本集中貯存設施安全措施

國內過去計畫研究已針對日本用過核燃料乾式貯存設施進行資料蒐集與研析 [1-6]。日本有兩個核能電廠設有室內乾貯設施，一個是東京電力(股份有限公司)福島第一核能發電廠，另一個是日本原子力發電(股份有限公司)東海第二核能發電廠。另外，本計畫案例研究之青森陸奧 (Mutsu) 廠外集中貯存設施，因應福島事件後法規要求重新進行耐震評估與設計審查。本計畫研究已就福島事件後日本用過核燃料貯存設施之耐震設計要求與意外安全分析，進行資料蒐集與研析 (詳第二章與第三章)。本節進一步蒐集資料與研析，集中貯存設施針對運輸安全所可以採取的主動防護措施。

日本神戶製鋼在2009年接受 RFS 公司委託，為青森縣陸奧市用過核燃料集中貯存設施，生產與製作貯存建築物之內裝設備，參與許可申請，設備設計、製作、安裝與試運轉各個階段作業[4-11]。用過核燃料用金屬護箱從電廠運送到貯存場，由專用拖車送進貯存建築物內“搬入區”後，再用天車將金屬護箱吊起、送至“暫存架”上。天車接著將橫躺之護箱送到“豎立架”上，以便從護箱上部與下部將運輸用緩衝材料移除，再將護箱送到“存放架”。架上護箱之後就用氣動式台車送到“檢查台”，在護箱上安裝監測所需儀器，最後送到事前規劃的貯存位置、將護箱固定在樓板上。

為確保場內運輸安全，針對下列設備採取了相關安全措施與試

驗認證：

(1) 搬入區天車

設置衝突防止區域，且針對混凝土樓板與有緩衝材之鋪面分別限
高 4 m 與 2 m

(2) 金屬護箱吊具

有主、副雙重吊臂之4點式垂直吊具，與幅度可調整以供4種不同
尺寸護箱之水平吊具

(3) 暫存架

架台腳部結構可以調整、以存放4種不同尺寸之護箱

(4) 豎起架

架台下方設置緩衝材，使金屬護箱即使傾倒也不受損

(5) 緩衝材

以商用軟體 LS-DYNA分析確定，軟木外加不銹鋼之緩衝材可以
吸收金屬護箱傾倒能量、降低衝擊

(6) 檢查台

提供金屬護箱進行貯存前、後檢查，搬出前檢查，或貯存期間修
復作業。

(7) 貯存架固定扣件

為防止護箱受震傾倒，用10支高強度螺栓將護箱固定在貯存架，而貯存架底部採插樺接合錨定於樓板。

4.5 綜合評比

如表 4-1 所示，德國與日本之室內乾貯設施都是在 1995 年啟用，由於兩國過去都採取核燃料再製之策略，故皆選擇以金屬護箱系統來存放用過核燃料，再放置在混凝土建築結構內進行內貯存。比較最近的案例，2016 年啟用之英國 Sizewell B 電廠內乾貯設施，則是採用與國內相同的混凝土護箱，加上（輕）鋼構之屋架來。

表 4-1 國際室內乾貯設施案例與比較

乾貯設施	啟用時間	結構系統	乾貯設施	監測項目	水源特性
英國 Sizewell B 電廠乾貯	2016	(輕)鋼構 (S)	混凝土護 箱系統	溫度 壓力 輻射	海水
德國 Gorleben 集中乾貯	1995	鋼筋混凝 土 (RC)	金屬護箱 系統	壓力 輻射	(含鹽)河水
日本福島 第一電廠 乾貯	1995	鋼筋混凝 土 (RC)	金屬護箱 系統	溫度 壓力 輻射	海水

無論是金屬護箱或混凝土護箱，乾貯系統本身都可有足夠之輻射防護能力，所以貯存建築物僅為減低外部環境對乾貯設施之影響。為了降低建築物地震破壞對乾式貯存設施之核能安全性造成影響，前述

混凝土建築物之設計要求確保大地震下也幾乎保持彈性、避免損壞，相較之下(輕)鋼構建築物之評估重點則在於確認鋼構件即使破壞也不會影響貯存護箱。

如同國際原子能委員會 (IAEA) 所述，核能設施之安全設計規範從過去各國特色發展，演變到今日已全球標準趨於一致。因此，上述案例之用過核子燃料貯存設施在設計上，一方面要考慮火災，地震，洪水，坡地滑動，雷擊或飛機衝突等外部危害度，另一方面也都重視如操作錯誤或護箱掉落等內部意外。從結構力學的觀點來看，假想的墜落 (drop) 或翻倒 (tip-over) 等運輸意外比地震等自然災害更可能對護箱造成嚴重損害，也是安全評估中最應重視的一個環節。

針對用過核燃料與高放射性廢棄物，因應各國最終處置方案延遲，包括冷卻池與貯存護箱等中期貯存設施就變得更加重要。隨著設施使用時間之增加，週期性的安全評估與劣化管理計畫會面臨很多過去未有的新挑戰。相關研究與管制作業除了應確保用過核燃料長期貯存安全性，也應該事前妥善規畫監測儀器、蒐集最終處置作業所需的關鍵資訊，與強化紀錄保存與知識管理相關技術能力。

第五章 我國用過核子燃料集中貯存設施安全標準 與審查作業導則草案精進建議

5.1 集中貯存設施特性與發展需求

用過核燃料從反應爐取出後，通常會先放在爐心旁冷卻池保存十年，之後移出到電廠或廠外之其他獨立場址進行中期貯存。中期貯存可以採取濕式設施或乾式設施來進行。一般而言，濕式貯存（即冷卻池）讓用過核燃料之未來處置，保有最多的可能選項。乾式貯存（護箱系統）則在貯存容量與維護成本上佔有絕大的優勢。無論金屬護箱或混凝土護箱，本身設計都具有足夠之輻射防護能力。也因為如此，護箱系統理論上可以直接採取露天貯存，而室內所用建築物在設計上並不要求提供輻射安全功能。中期貯存設施可以建置在電廠反應爐廠房外或電廠外其他獨立場址。為方便管理，用過核燃料通常會集中存放在一個場址，進行集中式貯存（centralized storage）。在過渡時期，如德國在乾貯設施建置完成前5年，與日本福島事件後緊急措施，就曾將裝有用過核燃料之金屬護箱個別放入混凝土模組中，進行分散式貯存（decentralized storage）。另外，德國中期貯存也有採用地下貯存坑道。

曾有報告 [5-1] 蒐集與分析 12 個國家案例，探討用過核燃料集

中貯存設施之發展策略。結果發現，因為各國採取的貯存策略，場址選擇，設施規模，與集中貯存相關管理與制度問題之不同，其集中貯存設施也會有不同之發展。借鏡國際集中貯存設施發展經驗，國內未來規劃相關設施與進行設計審查時應該考量以下需求：

(1) 技術需求

集中貯存設施已有超過30年以上實際使用經驗，相關技術評估支持其繼續使用至50年，而超過50年至300年很長時間之貯存需求，則須進一步技術研究與發展。

(2) 場址選擇

場址選擇涉及很多權利相關者，特別是政府與地方團體。爭議的問題點在於用過核燃料之貯存時間與遷出保證，但這些問題往往因為最終地質處置之延宕而變得更加難以處理。從瑞士 (ZWILAG 設施)，荷蘭 (HABOG 設施) 與加拿大 (Bruce WMF) 的案例可知，場址選擇的成功關鍵在於執行單位能否取得民眾對集中貯存之認同與支持。

(3) 法規和環境要求

各國設施核照法規都不相同。至於環評，需要公眾諮詢與聽證程序，讓涉入之政府各層級管理部門與民眾互動溝通。執行單位則須借助公民參與計畫，以取得民眾意見。

(4) 資源需求

大部分執行單位須借助外部建築師與工程管理公司，建置集中貯存設施。隨著全球經濟之發展，可參與建置作業之多國籍供應商與私人公司穩定地成長增加。相關建置成本，有些國家以核能發電回饋金因應，有些國家則將之列為電廠負債。

(5) 操作與維護

集中貯存設施強調以簡單、被動的方式，長期來減少操作與維護之成本與訓練，而乾式護箱貯存則是最佳方案。

(6) 基礎設施

包括運輸系統，場址基礎設施，與安排用過核燃料移出廠外之基礎設施，其可用性是最主要的考量點。對於集中貯存設施，特別是場址距離原電廠有數百公里時，運輸計畫將需要非常可觀之投資，而相關基礎設施發展包括選擇運輸模式（鐵路、道路或水路），包裝容器，車輛與交通事故緊急應變系統。

(7) 公眾接受

貯存計畫之執行通常是政治性決定的結果，因為用過核燃料之所有者（電廠）在取得民眾共識前無法執行貯存計畫。民眾意見對於決策之影響日增，可見於很多國家與計畫，例如：立法與政策，以及計畫之場址選擇，技術選擇與全體參與等。集中

貯存之場址選擇與運輸路徑，特別需要與民眾溝通和取得支持合作。

(8) 計畫執行

在技術成熟與廠商支持之情況下，5至10年內可以實現集中貯存設施建置計畫，且計畫最初幾年會進行可行性評估，先確認環境與場址特性。受限於運輸後勤與前面設施容量，集中貯存設施之啟用會比建置需要更長的時間。未來考慮100年以上久更長時間之貯存，可能有更多課題需要更多時間來解決。

5.2 設計審查與安全管制建議

國內主管機關目前以美國核管會 (NRC) NUREG-1567 持照審查技術報告[1-1] 為基礎，提出「用過核子燃料乾式貯存設施安全分報告審查規範 (草案)」與「用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業導則 (草案建議)」。日本與台灣在自然環境與社會文化有很多相似之處，但用過核燃料貯存設施所用之乾貯護箱系統有所不同，本計畫研究因此研析 (1) 福島事件後日本用過核子燃料貯存設施新安全設計審查基準，(2) 青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施設計審查案例，與 (3) 國際間室內乾式貯存設施耐震設計及意外事故評估方法，以對用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業提出

建議。根據計畫研究，主要之研究發現與建議如下：

- (1) 日本福島事件後，用過核子燃料貯存設施之安全設計標準與審查作業強制改為從新、從嚴，也就是即使是舊的設施也應依照最新的規範、持續檢討與提升安全性能。
- (2) 福島事件後，日本核能設施設計基準地震力之決定方法有大幅度變動，另外也要求對海嘯、火山等自然災害加強防護，但相關調查相當費時，以致新規範之適用性審查進度緩慢。
- (3) 護箱墜落 (drop) 或翻倒 (tip-over) 等假想的意外情境下反向加速度效果 (deceleration effects)，遠大於地震造成的結構反應加速度。故根據意外分析結果進行結構耐震再評估有其正當合理性。另一方面，若要電廠外獨立場址建置集中貯存設施，應充分考量運輸安全與應變措施。
- (4) 根據日本與德國之專家意見，無論金屬護箱或混凝土護箱設計都有足夠之輻射防護能力。也因為如此，護箱系統理論上可以直接採露天貯存，而室內貯存所用建築物在設計上並不須額外要求提供輻射防護功能。
- (5) 室內乾貯之設計審查重點有三，即輻射防護，結構安全與通風機能。特別是，混凝土樓板須支撐貯存容器，具有核能安全功能，而上部建築結構僅為降低環境對貯存護箱之影響、不具核能安全功能，但

考量海洋環境之影響應作耐候性要求，而整體建築設計更應分析確認不影響室內通風與護箱氣冷功能。

(6) 根據國際發展趨勢，中期貯存設施應進一步對50以上乃至300年很長時間，包括劣化等問題納入長期安全評估與影響研究計畫中。

5.3 性能規範與研究發展建議

國內過去已有用過核燃料室外貯存設施之設計審查經驗，在既有的基礎上持續提升設計審查與安全管制之能力，將可為國內用過核燃料提供室內貯存或廠外集中貯存之更多可能選項。福島事件後，國際核能設施已轉向性能規定、性能導向設計作發展，值得國內主管機關深入瞭解、以調整相關的設計審查業務。結構設計方法之種類，手法與特徵整理如表5-1所示。性能規定/導向設計包括三個執行步驟：(1) 設定設計目標與性能水準，(2) 為達成目標性能，採用適當的設計方法與設定結構參數，與 (3) 進行性能評估，確認達成設定的設計目標與性能水準。依設計者的想法與專業判斷，選擇適當的設計手法與工程技術；與過去比較，設計方法並未因性能規定而改變。例如，結構性能設計仍應包含既有的容許應力計算與極限強度檢核。但是隨著設計(者)的觀點之改變，結果就允許設計(者)可以選擇更多不同的方法來實踐，例如更先進的調查方法或精度更高的分析法。

表5-1 結構設計方法之種類，手法與特徵

種類	手法	特徵
容許應力設計	對設定的載重，檢核構件斷面應力在材料容許應力以下	結構應力限制在容許值以下
極限強度設計	考慮材料降伏、斷面應力部分進入塑性，計算構件極限強度與外力載重進行比較，檢討安全係數	安全係數限制在要求值以上
性能規定/導向設計	<p>結構性能設計應包含容許應力計算與極限強度檢核；設計依以下三個步驟進行</p> <p>(1) 設定設計目標與性能水準</p> <p>(2) 為達成目標性能，採用適當的設計方法與設定結構參數</p> <p>(3) 進行性能評估，確認達成設定的設計目標與性能水準</p>	<p>依設計者的想法與專業判斷，選擇適當的設計手法與工程技術；與過去比較，設計方法並未改變，而是設計者的觀點改變、結果允許設計選擇更多不同的方法</p>

無論是從設計理論或實務經驗來看，核能設施之安全性是奠基在可靠的基礎設施之上。本計畫案例研究之日本青森陸奧廠外用過核子燃料集中貯存設施，為了檢核原有結構設計是否滿足福島事件後新規範要求，在設計基準地震、海嘯與火山之設定時，就採用了更先進的三維地質結構調查，此即為反映日本當局要求的性能規定/導向設計之結果。

核能設施除了土木結構，還有建築機械與運輸設備。相較於廠內貯存，裝有用過核燃料之貯存護箱在送往廠外進行集中貯存的過程中，運輸安全性之要求會大幅度地提高，而對應的機械設備也會要求提高性能目標與設計水準。也因此，本計畫研究蒐集與研析日本神戶製鋼報告，說明上述集中貯存設施建築物之內裝設備，特別是為運輸安全、試運轉前所製作的很多機械設備。

另外，與國內同樣採取混凝土護箱系統之英國 Sizewell B 核電廠內室內乾貯，其設計審查經驗是特別值得參考的。相較於室外乾貯，室內乾貯設計必須非常重視建築被動式通風設計，以確保貯存護箱本身可以持續自然氣冷、系統除熱性能不因建築物配置不當而有所受損。為了國內未來室內貯存與場外貯存之可能需求，除了輻射防護與土木結構，也應該進一步考慮機械設備與運輸安全，進行跨領域技術規範之審議研究。

參考文獻

- [1-1] Nuclear Regulatory Commission (NRC) (2000). *Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities (NUREG-1567)*, Washington, D.C.
- [1-2] 原能會物管局 (2018). 用過核子燃料乾式貯存設施安全分報告審查規範 (草案)
- [1-3] 原能會物管局 (2018). 用過核燃料集中貯存設施安全標準與審查作業導則 (草案建議)
- [1-4] 台灣電力公司 (2016). 核電廠除役先期啟動工作乾貯設施
<https://www.moea.gov.tw/mns/CNC/content/wHandMenuFile.ashx?file_id=16636>
- [1-5] 台灣電力公司 (2017). 放射性廢棄物最終處置應變方案(集中式貯存) 推行初步規劃書
- [1-6] 張惠雲 (2015). 日本用過核子燃料乾式貯存安全技術發展研析成果報告，行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫 (編號: 104FCMA005)
- [2-1] 日本用過燃料貯存事業規定
<<https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/nuclearfuel/chozou/chozou0.html>>
- [2-2] 日本用過燃料貯存事業之審查、檢查相關條文/施行細則
< <https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/nuclearfuel/chozou/chozounaiki.html> >
- [2-3] 日本原子力規制部 (2017). 使用済燃料の貯蔵の事業に関する審査業務の流れについて.
- [2-4] 日本法規線上検索資料庫 < <http://www.e-gov.go.jp/faq/law/index.html> >
- [2-5] 日本原子力規制委員會 (2013). 基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド
- [2-6] 日本原子力規制庁. (2017). 原子力発電所敷地内での輸送・貯蔵兼用キャスクによる使用済燃料の貯蔵に係る基準の見直しの方向性について
- [2-7] 鹿島出版会. (2014). 原子力耐震工学
- [2-8] 東京電力株式会社 (2011). 福島第一原子力発電所新耐震指針に照らした耐震安全性評価 (中間報告) -建物・構築物- (コメント回答)
- [2-9] 東京電力株式会社 (2011). 福島第一・第二原子力発電所における耐震安全性の評価結果 (中間報告) について
- [3-1] RFS公司簡史 <<http://www.rfsc.co.jp/company/history.html>>
- [3-2] 京都大学学術出版会 (2017a). 原子力安全基盤科学①原子発電所事故と原子力の安全
- [3-3] 京都大学学術出版会 (2017b). 原子力安全基盤科学②原子力バックエン

ドと放射性廃棄物

- [3-4] 青森縣政府網頁
< <https://www.pref.aomori.lg.jp/sangyo/energy/0001tyuukan.html> >
- [3-5] RFS公司用過核燃料貯存設施之審查會議網頁
<http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tekigousei/nuclear_facilities/STO/committee/index.html>
- [3-6] RFS公司用過核燃料貯存設施之公聽會網頁
<http://www.nsr.go.jp/disclosure/committee/youshikisya/tekigousei/nuclear_facilities/STO/meeting/index.html >
- [3-7] RFS公司用過核燃料貯存設施20181130審查進度報告
<<http://www.rfsc.co.jp/news/news/h30/news301130.pdf>>
- [3-8] 日本原子力規制委員會 (2013). 基準津波及び耐津波設計方針に係る審査ガイド
- [3-9] RFS公司用過核燃料貯存設施20181112審查進度報告
<<http://www.rfsc.co.jp/news/news/h30/news301112.pdf>>
-
- [4-1] Bhasker (Bob) Tripathi (2013). “Overview of Independent Spent Fuel Storage Installations (ISFSIs) in the New Madrid Seismic Zone (NMSZ) and Wabash Valley Seismic Zone (WVSZ),” the 22nd Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-22 Transactions), San Francisco, California, USA - August 18-23, 2013 Division IX – Paper 409
- [4-2] IAEA (2001). *Seismic Design Consideration of Nuclear Fuel Cycle Facilities*, IAEA-TECDOC-1250, Vienna, Austria (ISSN 1011-4289)
- [4-3] Yumiko Kumano, Bernhard Droste, Makoto Hirose, John Harvey, Ingo reiche, Dietmar Wolff , Paul McConnell, Kasturi Varley (2013). “IAEA’s International Working Group on Integrated Transport and Storage Safety case of Dual Purpose Casks for Spent Nuclear Fuels,” NEA/CSNI/R (2013)10, p.187-202
- [4-4] Bruno R. Thomauske (2002). “Interim Storage of Spent Nuclear Fuel in Germany- Situation- State of Licensing Procedures, Prospects-,” WM’02 Conference, February 24 – 28, 2002, Tucson, AZ
- [4-5] W. Botsch, S. Smalian, P. Hinterding, H. Drotleff, H. Völzke, D. Wolff, E. Kasperek (2013). “Safety Aspects of Long Term Spent Fuel Dry Storage,” NEA/CSNI/R (2013)10, p.241-253
- [4-6] “First cask emplaced at Sizewell B fuel store,” World Nuclear News 23 March 2017, ISSN 2040-5766
- [4-7] ONR (2014). *Stage Submission 2 – Commencement of Construction Dry Fuel Store Building State*, Project Assessment Report ONR-SZB-PAR-14-006,

- Revision 0, May 2014.
- [4-8] ONR (2016). *Consent for Commencement of Active Commissioning of Sizewell B Dry Fuel Store Process*, Project Assessment Report ONR-OPF-PAR-16-016, Revision 0, December 2016.
- [4-9] Office for Nuclear Regulation (ONR), (2017). *Security Assessment Principles for the Civil Nuclear Industry*, Redgrave Court Bootle Merseyside L20 7HS.
- [4-10] Andrew Buchan (2013). “The Safety Assessment of Long term Interim Storage at Sellafield,” NEA/CSNI/R (2013)10, p. 313-334
- [4-11] Makoto Shiratani, Hidekatsu Hamada. (2014). “Interim Storage Facility for Spent Fuel,” FEATURE: Natural Resources and Energy, Kobe Steel Engineering Report Vol. 64 No. 1
- [5-1] Mohan Rao, Dave Hardy (2003). “Status of Centralized Storage Systems for Used Nuclear Fuel – a Background Paper Prepared for the Nuclear Waste Management Organization (NWMO),” Hardy Stevenson and Associates Limited, Toronto, Canada