

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

用過核子燃料循環管理方案技術可行性研究(101 年度工作)

計畫編號：101FCMA006

報告編號：101FCMA006-11

執行單位：核能研究所

計畫主持人：周鼎

子項工作負責人：邱琬琚

報告作者：邱琬琚

報告日期：中華民國 101 年 12 月

(本頁空白)

# **Technical Feasibility Study on Spent Nuclear Fuel Cycle Management**

## Abstract

The up-to-date international status of spent nuclear fuel information and management strategy are reviewed and summarized in this report. In accordance to the request of decommissioning of nuclear power plant, the regulations and review guidances of dry storage of damaged spent fuel are also evaluated. The latest trends of international research project of dry storage, including the Extended Storage Collaboration Program reports, regulations update information are also involved in this report.

The international experience can benefit the spent nuclear fuel management strategy and regulatory enhancement program of Taiwan.

Keywords: spent nuclear fuel cycle, extended dry storage, damaged spent fuel dry storage.

Institute of Nuclear Energy Research

# 用過核子燃料循環管理方案技術可行性研究

## 摘 要

本報告彙整分析國際主要核能國家用過核子燃料資訊及其管理方案最新動態；因應電廠除役需求，研究國際間對於破損燃料乾式貯存管制或審查規範；國際用過核子燃料乾式貯存技術最新發展趨勢，包含美國電力研究所延期貯存合作計畫工作報告研析及乾式貯存管制法規更新資訊；美國除役核電廠用過核子燃料貯存安全管制技術規範與案例蒐集。

本研究果有效掌握國際研發趨勢及參考國際管制資訊與安全標準，可加速國內用過核子燃料管理策略研發技術發展及提升國內管理安全水準，確保處置安全合於國際標準。

關鍵字：用過核子燃料循環、延期乾式貯存、破損燃料乾式貯存。

核能研究所

# 目 錄

1. 前言 .....	1
1.1 研究目的 .....	1
1.2 研究內容 .....	1
1.2 研究內容 .....	2
2. 國際用過核子燃料循環管理方案最新資訊 .....	3
2.1 美國 .....	3
2.2 日本 .....	5
2.3 韓國 .....	7
2.4 歐盟 .....	8
2.5 法國 .....	9
2.6 加拿大 .....	10
2.7 英國 .....	11
3. 國際破損用過核子燃料乾式貯存安全管制技術規範 .....	13
3.1 IAEA 破損燃料管理技術報告 .....	13
3.2 美國破損燃料乾式貯存安全管制法規 .....	21
3.3 國際破損燃料乾式貯存案例蒐集 .....	27
4. 國際用過核子燃料乾式貯存技術規範最新發展 .....	29
4.1 美國延期貯存合作計畫(ESCP) .....	29
4.2 美國乾式貯存管制技術最新發展動向 .....	37
4.3 美國除役核電廠用過核子燃料貯存安全管制 .....	38
5. 結論 .....	43
參考文獻 .....	44

## 附 圖 目 錄

圖 3.1.1 破損燃料鑑別方法論流程圖.....	14
圖 3.1.2 分離破損燃料之判斷流程.....	15
圖 3.1.3 破損燃料分離檢測流程.....	17
圖 3.2.1 用過核子燃料關係圖.....	24
圖 3.2.1 破損燃料分類流程圖.....	26
圖 4.1.1 破損燃料分類流程圖.....	32
圖 4.1.2 美國乾式貯存護箱分佈圖.....	32
圖 4.1.3 美國乾式貯存之用過核子燃料數量分佈圖.....	33
圖 4.1.4 美國多用途乾式貯存護箱分佈圖.....	33

## 附 表 目 錄

表 3.1.1 常用的 LWR 燃料檢測技術.....	18
表 3.1.2 非標準處理方式 VS. 缺陷種類.....	21
表 3.3.1 國際破損燃料定義與處置方式.....	28
表 4.1.1 延期貯存合作計畫參與國家與研究主題.....	34
表 4.1.2 延期貯存所需技術差異研究主題-應力腐蝕破裂(SCC).....	35
表 4.1.3 延期貯存所需技術差異研究主題- 跨領域(Cross Cutting).....	36

# 1. 前言

## 1.1 研究目的

核能發電自 1950 年代開始興起，用過核子燃料之處置方式一直被視為核能工業關鍵的一環。尤其是日本 311 福島事件之後，如何安全管理用過核子燃料成為國際與公眾關切的議題。

基於管制業務技術研發需求，行政院原子能委員會放射性物料管理局爰委託核能研究所執行「101 年度精進放射性物料安全管理技術發展」計畫。本報告為該計畫所屬第 2-1A 子項計畫「用過核子燃料貯存安全管理技術發展」中「用過核子燃料循環管理方案技術可行性研究」工作之第 1 年研究成果。

本計畫的目的在於協助管制單位蒐集評估國際用過核子燃料循環管理方案最新發展資訊、掌握國際乾式貯存最新技術發展，提供國內用過核子燃料長程營運策略更多的彈性，有效推動用過核子燃料之永續安全管理。

因應我國核一廠一號機若無延役措施，將於 107 年除役，其用過核子燃料管理成為重點工作。本計畫將蒐集研析國際破損燃料乾式貯存及除役核電廠用過核子燃料貯存安全管理技術規範，重點深入研究相關法規，以提供我國管制機關最新且完整的國際資訊，作為國內後續安全管理之參考依據。

## 1.2 研究內容

依據委託研究計畫申請書擬定之規劃，「用過核子燃料循環管理方案技術可行性研究」101 年度研究內容如下：

- (1) 蒐集國際重要組織及各國之用過核子燃料循環管理方案最新發展動向等資訊；以國際核能機構技術報告、國際會議期刊及資訊蒐集彙整為主要

方法，探討分析世界各國對於用過核子燃料循環管理方案之最新研究發展與趨勢。

- (2)彙整分析國際組織及各國對於破損及未耗乏用過核子燃料乾式貯存安全管理技術規範，此資訊可供國內後續安全管理作業之參考。
- (3)蒐集國際組織及各國之用過核子燃料乾式貯存技術規範最新發展動向等資訊。
- (4)蒐集國際除役核電廠用過核子燃料貯存安全管理技術規範。

本報告內容為上述項次(1)~(4)之彙整分析結果。蒐集的文獻資料另整理歸類後以光碟提送物管局參考。

## 1.2 研究內容

本報告為計畫之第一年度成果報告，報告內容第 1 章說明研究目的、研究內容與報告架構；第 2 章說明國際用過核子燃料循環管理方案最新資訊；第 3 章說明國際破損用過核子燃料乾式貯存安全管理技術規範；第 4 章為國際用過核子燃料乾式貯存技術規範最新發展分析及除役電廠用過核子燃料貯存安全管理資訊與議題；第 5 章為結論。

## 2. 國際用過核子燃料循環管理方案最新資訊

本章主要彙整說明世界主要核能機構與國家對於用過核子燃料循環管理方案之最新資訊與趨勢。

### 2.1 美國

美國目前運轉中之核能發電機組計 104 座，發電量約佔全國電力 19.7%。其用過核子燃料營運策略原在 1977 年卡特總統宣布無限期凍結在處理政策後，走向直接處置。美國國會於 1982 年通過核能廢棄物政策法案，並於 1987 年將最終處置場址訂於內華達州的雅卡山(Yacca Mountain)，同時令美國能源部開始進行場址特性調查，其處置母岩為凝灰岩，原依其規劃，其最終處置場預定於 2020 年開始運轉。(USDOE, 2002)

在用過核子燃料直接處置政策推動近 30 年後，美國為了能源永續利用、防止核武擴散及將放射性廢棄物減到最少，政策已開始有所調整。先是 2006 年由當時美國布希總統提出全球核能夥伴(Global Nuclear Energy Partnership, GNEP)構想，其目的為(1)脫離海外化石燃料的依賴；(2)發展無核子擴散憂慮的再處理技術；(3)實現對環境無害之發展理想等。(US GNEP, 2006)美國能源部並於 2006 年 2 月 6 日宣佈新的研究計畫，投入商用核電廠用過核子燃料再處理技術研究；同時能源部仍積極推動雅卡山計畫，並於 2008 年 3 月向美國核能管制委員會(NRC)提送建造執照申請。

惟在 2009 年 1 月現任總統歐巴馬就職之後，宣布中止雅卡山直接最終處置計畫，並於 2010 年 1 月由 15 位成員組成藍帶專業委員會(Blue Ribbon Commission, BRC)，重新檢討美國用過核子燃料與高放射性廢棄物的長程營運策略。

美國藍帶專業委員會(BRC)於 2012 年 1 月 26 日向能源部朱棣文部長提出針對美國核廢棄物整合管理策略的結論建議報告，其中三個小組委員會亦針對核廢料處置、反應器與核燃料循環技術及運輸貯存提出分項報告，此建議報告對於美國未來用過核子燃料管理具有相當的影響力。(USBRC, 2012)

藍帶專業委員會提出的 8 項建議如下：

1. 建立能被認同的核廢棄物管理設施選址程序。
2. 設立專責機構推動廢棄物管理，並予以授權與提供資源。
3. 增加核設施的後端基金提撥率以備廢棄物管理所需。
4. 致力開發一處新的深層地質處置設施。
5. 致力開發一處以上的集中貯存設施。
6. 預先規劃用過核子燃料/高放射性廢棄物貯存與處置運輸。
7. 持續推動核能技術創新與人力培養。
8. 主動領導國際合作達成核廢棄物安全、管理、防止擴散、保防等目標。

雖然藍帶專業委員會提出的報告採取全面考量方式並針對主要議題皆有描述，其提出的 8 項建議也很適當，然而報告內忽略了由雅卡山(Yucca Mountain)所學到的教訓及對於用過核子燃料管理政治考量理想化。

美國 Nuclear Energy Insider 將於 101 年 11 月底針對藍帶專業委員會提出的建議舉辦一個美國用過核子燃料策略研討會，會中邀請美國管制單位、電力公司、核能產業界及國際上核能研究單位參加。會議討論重點為如何執行藍帶專業委員會的建議、用過核子燃料貯存管理策略、用過核子燃料中期及長期貯存、用過核子燃料運送及用過核子燃料最終處置等相關安全議題。本所已派員參加此會議，可取得國際最新用過核子燃料管理等資訊，將進行研析後納入明(102)年度工作報告中。

由於最終處置計畫延宕，2011 年 1 月 NRC 變更法令將電廠貯存用過核子燃料的時間延長為停止運轉後 60 年，以因應處置場設置的延期。美國環保團體及東北四洲(康乃狄克州，新澤西州，紐約州和佛蒙特州)於 2011 年 2 月共同提起訴訟，指稱 NRC 濫用其自由裁量權，並違反了國家環境政策法(National Environmental Policy Act)、行政程序法(Administrative Procedure Act NEPA)、原子能法(Atomic Energy Act) 和其他聯邦法律和法規。2012 年 6 月美國聯邦上訴法院哥倫比亞巡迴分院裁定，NRC 對於延長用過核子燃料暫時貯存於電廠內年限之法令，沒有進行足夠詳細的分析，因此裁定 NRC 必須進行額外的環境分析才能變更法令。

## 2.2 日本

日本擁有 62 部反應器機組，54 部運轉中，分別由 11 家電力公司或者機構負責運轉，約佔全國電力供應 30%。最主要的為東京電力公司(Tokyo Electric Power Company Inc, TEPCO) 與日本原子力發電株式會社(Japan Atomic Power Company Inc, JAPCO)。

2011 年 3 月 11 日東北地區 9.0 級大地震引發之海嘯，造成福島一廠 1 號機到 4 號機反應器核能事故，包含福島一廠機組內的 52 部機組均陸續停機，僅有大飯電廠 3 號與 4 號機組於 2012 年 7 月恢復運轉。

日本原訂的用過核子燃料循環管理是以再處理為基本管理政策。截至 2011 年 3 月，日本共有 16,899 噸用過核子燃料(包含再處理廠貯存之 2,875 噸用過核子燃料)。大多數的用過核子燃料運往法國與英國進行再處理，迄 2008 年 3 月總共有 5,600 噸輕水式與 1,500 噸氣冷式反應爐的用過核子燃料，。再處理後的高放射性廢棄物則時陸續運回日本，貯存在日本原燃株式會社(JNFL) 位於六甲村(Rokkasho)的貯存設施。

日本目前有兩個用過核子燃料再處理廠，一個是日本原子力研究開發機構(JAEA) 管理之東海(Tokai)再處理廠於 1981 年 1 月正式運轉，到 2006 年 3 月已累計再處理 1,052 噸用過核子燃料。另一個則是日本原燃株式會社在六甲村(Rokkasho)興建，預定於 2012 年開始運轉，再處理廠每年可處理 800 噸。為因應貯存待再處理之燃料，六甲村(Rokkasho)建有中期貯存設備，自 1999 年開始接收用過核子燃料。

日本於福島事件後，國家核能政策正在重新討論修訂中，用過核子燃料循環管理方案也會根據其核能政策改變。2011 年 7 月日本政府成立能源與環境委員會(Enecan 或 EEC)，將提供到 2050 年日本的能源未來國家政策建議，主要討論核能發電未來，日本原子能委員會及中央環境審議會皆移至此委員會下。

能源與環境委員會初步建議核能政策有三個選項：於 2040 年時，核能發電比率為 0%、15%、20-25%，而其對應的用過核子燃料循環管理方案則為全部最終處置、部分最終處置及部分再處理、全部在處理。

能源與環境委員會接著在 2012 年 9 月 15 日發布“創新能源與環境策略 Innovative Energy and Environment Strategy”，建議到 2040 年逐步淘汰核電。短期內，暫時停機的機組若通過核能監管單位審核許可後，可重新啟動，直到 40 年運轉執照過期為止，而用過核子燃料再處理政策將持續進行。2012 年底前集中採用進口天然氣及煤炭發電。

然而，此份申明引起日本國內業界反彈，表明為了避免嚴重的經濟影響，20%~25%核電比例是必要的，所造成的影響不僅僅是日本國內電力價格高漲，在過去一年內，化石燃料進口大幅增加是日本 2012 年上半年創紀錄之 2.5 萬億日元（31.78 億美元）貿易赤字的主要因素。日本經濟團體聯合會

(Keidanren) 更提出能源與環境委員會的淘汰核電之政策是不負責任的且獲得日本自由民主黨主席的同意。

2012 年 9 月 19 日(在能源與環境委員會發表申明的 4 天後)，日本內閣選擇將此策略列為“參考文件”。日本首相提出解釋說明：維持能源政策的靈活性是很重要的，因此此份文件的時間規劃將不納入考慮，用過核子燃料再處理作業將繼續進行，興建中的兩座核能機組 – Shimane 3 號機和 Ohma 1 號機將持續建造。一個新的基本能源規劃將進一步討論和協商後決定，特別是跟市政府主辦的核電廠。

用過核子燃料進行再處理前須經適當時間的中期貯存，東京電力公司與日本原子力發電株式會社於 2005 年合資成立 Recyclable-Fuel Storage Company (RFS) 公司專職中期貯存設施的管理工作，並在 Aomori 縣 Mutsu 市建造可循環燃料貯存中心(Recyclable Fuel Storage Centre)，以金屬護箱進行乾式貯存，第一期建築容量 3,000 噸，未來預計增建第二期至容量 5,000 噸。運轉執照已提交日本原子能安全保安院(NISA)審查，預定於 2012 年開始營運。

## 2.3 韓國

韓國目前有 21 部機組運轉中，5 部興建中。2008 年 8 月韓國政府提出核能發展計畫，預計增建約 10 部機組，使全國核能發電比率由 2007 年的 36% 增加到 2030 年的 59%。

到 2007 年底貯存中的 PWR 用過核子燃料為 4,327.53 噸；CANDU 重水式反應器用過核子燃料為 5,092.33 噸(其中 2,425.68 噸為乾式貯存，2,666.65 噸為濕式貯存)。除了部分 CANDU 用過核子燃料貯存於 Wolsong 核能電廠內的乾式貯存設施外，其餘均採核能電廠內濕式貯存。

核能電力公司-韓國水力與核能發電公司(Korea Hydro & Nuclear Power, KHNP)所負責營運的壓水式反應器(PWR)電廠，由於廠區腹地不足且建置一個異地集中乾式貯置場因當地民眾反對而無法成案，在未來 10 年將會面對用過燃料池空間不足的問題。

2004 年 12 月 17 日舉行的 253 次原子能委員會議，修訂國家放射性廢棄物管理政策，用過核子燃料管理問題將考慮國內外技術發展情況，延後再作政策決定。與美國的「核子合作雙邊協定」則是述明在 2014 年修訂協定之前不得從事用過核子燃料再處理作業，所以韓國的用過核子燃料處置議題將是美韓雙邊協定修訂的重要項目之一。

韓國原子能研究所(KAERI)從 1997 年起執行為期 10 年的國家型計畫，包括處置系統開發、系統功能與安全評估、系統驗證等，以研訂韓國的參考處置系統。2005 年 5 月 KAERI 在 Daejeon 興建地下研究坑道(Underground Research Tunnel, URT)進行相關現地試驗。2006 年依據歷年研發成果提出韓國參考系統(Korea Reference System, KRS)。後續將藉由地下實驗來驗證該系統的可行性。

## 2.4 歐盟

歐盟於 2011 年 7 月 19 日通過新的放射性廢物指令，各會員國應於 2015 年前訂定各國之放射性廢棄處國家方案，其內容包含計畫建置處置設施的具體時間表，以及實施此處置方案所需的活動描述、成本評估和融資計劃說明。此國家方案應定期更新，並應提供給公眾及從事人員，公眾也應給予有效地參與決策過程的機會。IAEA 所制定的安全標準具有法律約束力。另外，至少每 10 年應交由國際同行評審，交流經驗。

## 2.5 法國

法國目前運轉中之核能發電機組有 58 座，發電量約占全國電力的 76.2%，為全世界核能發電比率最高的國家。法國在執行核能計畫初期，由於自產的鈾礦數量有限，為了提升法國能源安全性的考量，強調用過核子燃料是一種資源而非廢棄物，即選擇採取用過核子燃料再處理策略。

法國每年再處理能力可達 1,700 噸。58 部運轉中的反應器中有 20 部可使用再處理產生的 MOX 燃料。法國每年退出反應器的用過核子燃料相當 1,150 噸，其中約 850 噸進行再處理，製成約 100 噸的 MOX 燃料，其餘則貯存於水池中。

法國放射性廢棄物管理政策之依據源於 1991 年 12 月 30 日的法案(Act of 30 December 1991)，而依據 2006 年「Planning Act」則要求相關機構要進行以下研發：

- (1) 長半化期核種分化與轉化(partitioning and transmutation)：2012 年提出現況報告，2020 年設立雛型廠，2040 年希望相關技術能實際應用。
- (2) 可逆的深層地質處置：2015 年提出執照申請審查，2025 年開始運轉設施。至少在 100 年期間維持廢棄物可以被回收。
- (3) 處理與貯存程序的改善：2015 年前建造新設施或改善舊設施。

由於法國再處理廠能力有餘裕，因此接受國際委託將用過核子燃料進行再處理，委託國家包比利時、荷蘭、德國、義大利、日本、與瑞士。依據「環境法規定 L.542 條(Article L.542 of the Environment Code)」規定，外國的放射性廢棄物即使在法國進行再處理，亦不得於法國處置，均須運回該產生國。

## 2.6 加拿大

加拿大目前共有18部機組運轉中，機型以CANDU型反應器與核子燃料，其採持續擴展核能政策，預計未來十年內將增建9部機組。

用過核子燃料目前暫貯於核電廠與中期貯存設施中，目前統計有來自22個核能發電機組及2個研究用反應器所產生的42,000噸用過核子燃料。用過核子燃料退出反應爐後，先於水池中貯存7年到10年，以降低其輻射熱與放射性，以後再移轉到乾式中期貯存設施。

濕式貯存設施位於Bruce、Darlington、Gentilly、Pickering、Point Lepreau等各核能電廠。乾式貯存設施位於Bruce、Douglas Point、Gentilly、Pickering、Point Lepreau等地。

核廢棄物管理專責機構(Nuclear Waste Management Organization, NWMO)：係依據2002年11月生效之「核子燃料廢棄物法(Nuclear Fuel Waste Act)」，由核能設施聯合成立的機構，主要工作向加拿大政府提出用過核子燃料長期安全管理的可能方法，並依政府的決定執行處置作業。

1996年加拿大發布「Policy Framework for Radioactive Waste」，確定政府對放射性廢棄物管理的體系與污染者付費的原則。

2005年NWMO向政府提出用過核子燃料長期管理的初步研究方案「Choosing a Way Forward」，並接受社會公開評論。內容包括核能電廠內延期貯存(reactor site extended storage)、集中式延期貯存(centralised extended storage)、深層地質處置場等三個技術方案。2007年政府核准NWMO採用「調適性階段管理(adaptive phased management)」的策略推動相關工作，以逐步發展技術並建立共識。亦即全程工作可能長達三百年，劃分三階段推動處置工作：

第一階段：興建集中貯存設施與地下實驗室。

第二階段：用過核子燃料集中進行中期貯存，持續處置研究與驗證。

第三階段：用過核子燃料重新包裝後運往處置場進行監測式處置，並保持可回收的功能。

## 2.7 英國

英國目前運轉中的核能發電機組有 19 部，發電量約占英國全國總發電量的 25%。反應器類型大多為進步型氣冷式反應器 (Advanced Gas-cooled Reactor, AGR)，其用過核子燃料於電廠短暫貯存至少約 100 天後，以鐵路運到 Sellafield 的燃料處理廠(Fuel Handling Plant, FHP)進行貯存與再處理。乾式貯存部分則僅有 Wylfa 電廠建置乾式貯存設施。

用過核子燃料營運策略以往採行再處理，然而在 2009 年公布的國家核能發電政策初稿中，新建造的核能機組將採取開放式燃料循環，用過核子燃料將長期貯存 100 年後移至最終處置場存放。(DECC, 2009)

2008 年 1 月 10 日英國政府發布「核能白皮書(White Paper on NuclearPower)」，認為核能是低碳能源的選項，在解決除役與廢棄物管理費用的前提下，政府將主動協助私人投資興建核能電廠，但蘇格蘭政府並不為白皮書背書，亦不同意於蘇格蘭興建核能電廠。

英國目前累積大量的放射性廢棄物，主要暫貯在 Sellafield，且預估在 2014 年會有 5,000 噸高放射性廢棄物；在 2100 年會有 700,000 噸中放射性廢棄物。長半化期低-中放射性廢棄物原先預定以 Sellafield 為深層地質處置場址，但計畫遭到民眾反對而終止。(RWMAC, 2002)。

2008 年 6 月英國政府發布「放射性廢棄物安全管理白皮書」，針對高放射性廢棄物深層地質處置問題進行架構規劃，並要求核子除役管理機構

(Nuclear Decommission Authority, NDA)負責相關工作的推動與公眾溝通，目前尚未有具體長期管理政策。

### 3. 國際破損用過核子燃料乾式貯存安全管制技術規範

本年度工作內容為研析 IAEA 破損燃料管理技術報告、美國破損燃料乾式貯存安全管制審查導則及國際破損燃料定義與處理方式案例說明。

#### 3.1 IAEA 破損燃料管理技術報告

IAEA 針對破損用過核子燃料提出一個鑑別方法論(methodology)，此方法論可分辨需要額外處置之燃料以確保用過核子燃料之安全運轉、貯存、處理與處置(如再處理或最終處置)。具體來說，這個方法論可以鑑別具有重大缺陷之用過核子燃料並提供後續處理方式的建議，以確保此束燃料可滿足安全上、法規上及其他運轉條件之要求。

此方法論包含三個基本步驟，首先第 3.1.1 節提供確認用過核子燃料的特性與確保安全性與符合法規之準則，3.1.2 節討論各項缺陷檢測及測量技術來評估用過核子燃料現況，3.1.3 節討論非標準處理吊運方式之現有技術，其流程如圖 3.1.1 所示。

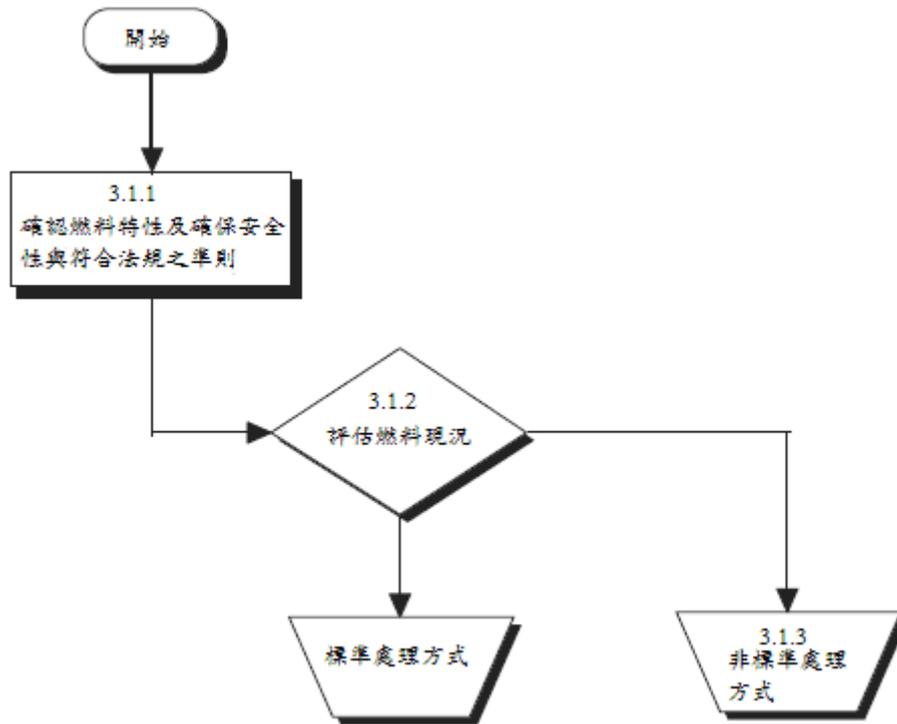


圖 3.1.1 破損燃料鑑別方法論流程圖

### 3.1.1 確認燃料特性及確保安全性與符合法規之準則

圖 3.1.2 描述確保此用過核子燃料符合其所需的功能和/或需要特殊處置之判斷準則。第一步應確認用過核子燃料之基本功能以合乎安全性、法規及運轉條件之要求：

- 避免輻射劑量高於法規限值
- 維持次臨界狀態
- 利用標準工具及技術將燃料安全取出
- 維持輻射劑量低於安全評估範圍
- 確保適當的衰變熱移除速率

第二步則是根據不同的處置方式來判斷此束用過核子燃料應符合哪些基本功能。接著將這些功能需求轉換成具體的燃料特性或其他參數，為了要將有缺陷的用過核子燃料歸類至破損燃料，必須將這些功能需求轉成一組具體

的燃料特性，且這些特性應能維持燃料在機械上與化學上的穩定性、燃料護套或其他屏蔽完整性和滿足運轉上所需任何標準裝置或吊運設備。

最後則是訂出破損燃料的判斷準則，其中包含燃料本身特性(如護套完整性、衰變熱、濃縮度、燃耗、燃料與護套組成成分等)及燃料貯存環境條件(如溫度、壓力、或其他環境條件會導致氧化、脆化或其他造成影響之機制)

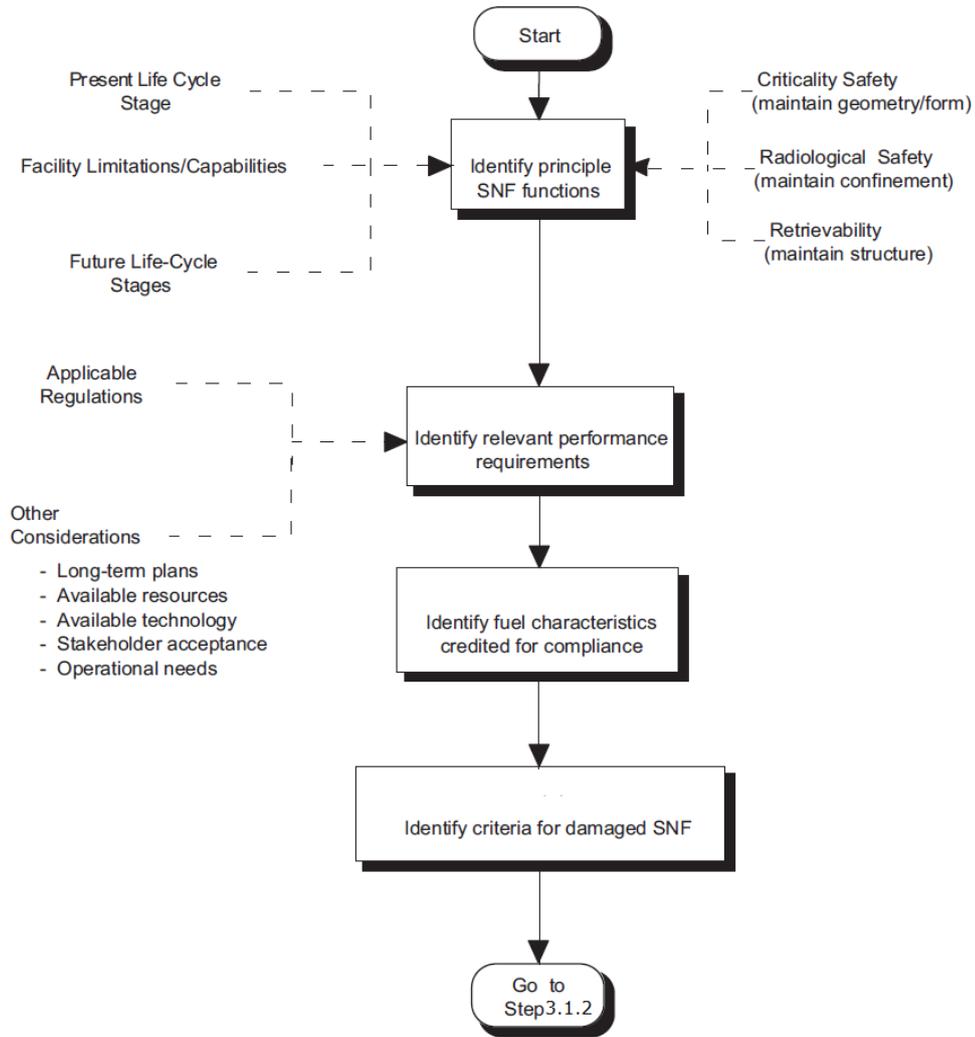


圖 3.1.2 分離破損燃料之判斷流程

### 3.1.2 評估燃料現況

根據上節所訂出的判斷準則，圖 3.1.3 描述了破損燃料分離檢測流程，其中利用表 3.1.1 所列之檢測技術來確認燃料完整性。表 3.1.1 主要摘錄針對輕水式反應器(LWR)之燃料檢測技術，其主要是設計用來檢測及檢定護套缺陷，僅有少數的檢測技術可用來檢測燃料結構損壞，如目視檢查或利用燃料吊車進行燃料束耐荷重測試。

在沸水式反應器中，常利用真空啜吸檢驗來找出破損燃料，真空啜吸檢驗利用燃料護套內外壓力差改變，若有燃料棒護套破損會導致內部分裂性氣體洩漏，可檢測其活度讀數來判定是否有破損發生。然而若是燃料棒破損時間與進行真空啜吸檢測時間相距太久，能夠量測的分裂氣體量有限，則會造成準確度降低，所以有燃料廠家提出外加輔助加熱源的方式來增加燃料護套裂口開啟並刺激已貯存數年的冷卻燃料束之分裂氣體釋出。

當找到破損燃料束後，目視檢測、超音波檢測、渦電流檢測及外徑量測等方法皆可用來找到破損棒及破損位置。

另一種值得注意的是燃料束結構組件損壞而非燃料護套破損，例如燃料格架、繫棒或導管、燃料束彎曲之顯著幾何變型及 PWR 上端板(top nozzle)應力腐蝕缺陷，大多數的結構損壞都可以利用目視檢測或燃料束吊運過程的幾何限制來找到。

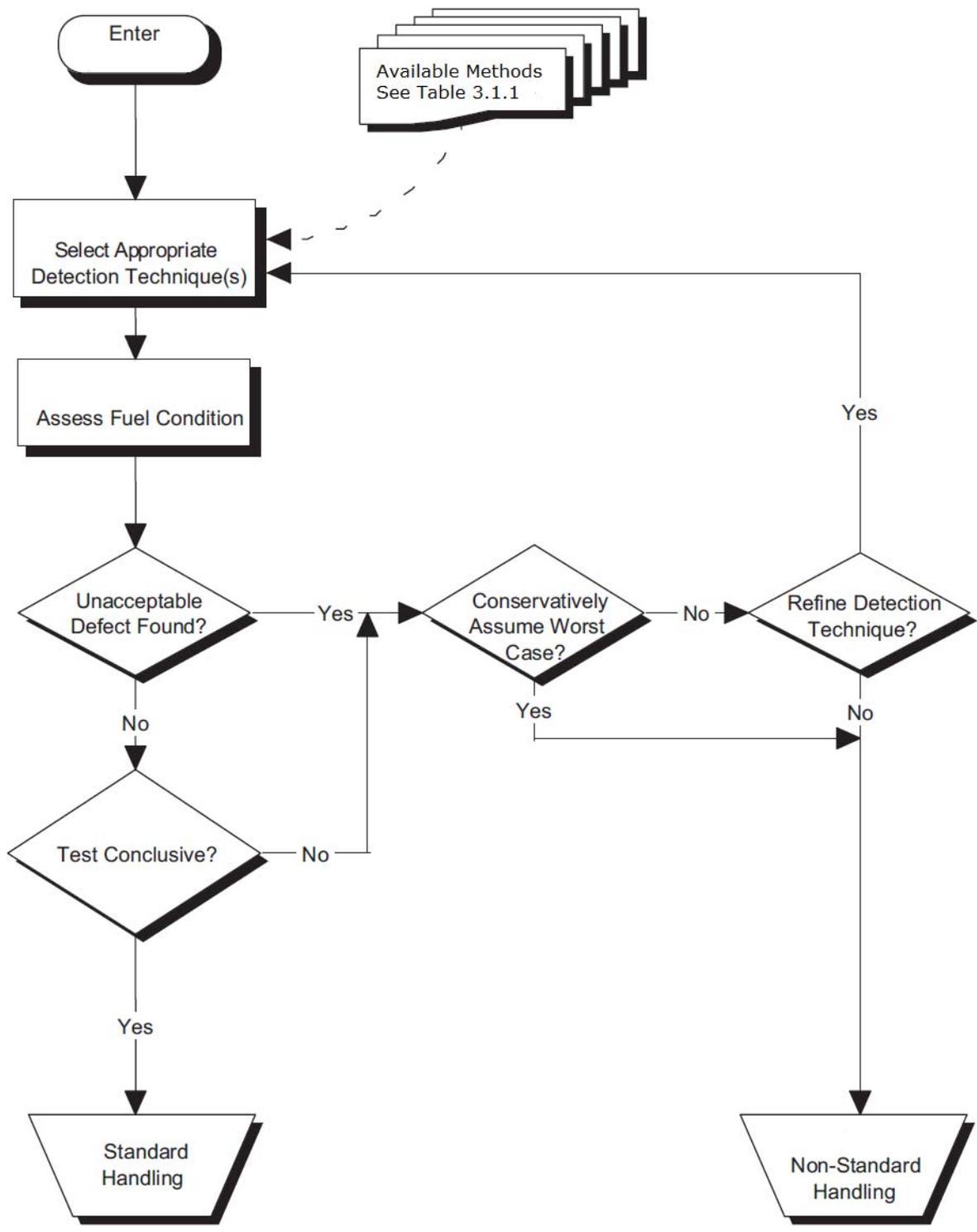


圖 3.1.3 破損燃料分離檢測流程

表 3.1.1 常用的 LWR 燃料檢測技術

檢測技術	測量特性	檢測位置	建議
On-line 監測	分裂產物活度	爐心	僅能記錄爐心內燃料； 無法判定是哪束燃料破損，需要輔助檢測方式來判定破損燃料； 可利用銫134/137的比值預測燃料棒燃耗
Off-line 監測	分裂產物及超鈾產物	爐心	主要冷卻水取樣檢測；較 online monitoring 限制少；可參考 on-line monitoring + 嚴重的燃料棒護套破損
On-line 啜吸	On-line <sup>133</sup> Xe 活度	燃料吊車	定性檢測； 改變燃料束流體壓力；測量爐心停機後移出 2 個月內的燃料束
Off-line 啜吸	On-line <sup>133</sup> Xe 活度 抽氣樣品 — <sup>133</sup> Xe 水樣—分裂產物	用過燃料池	定性檢測； 施加輔助加熱源；測量爐心停機後移出 2 個月內的燃料束
	On-line <sup>85</sup> Kr 活度 抽氣樣品— <sup>85</sup> Kr 水樣—分裂產物		定性檢測； 施加輔助加熱源；測量爐心停機後移出 10 年內的燃料束
	On-line <sup>133</sup> Xe 活度 抽氣樣品— <sup>133</sup> Xe 水樣—分裂產物		定量檢測； 施加輔助加熱源；測量爐心停機後移出 2 個月內的燃料束
Leaching test	銻及銫活度	用過燃料池	
目視檢測 (VT)	可見表面的缺陷； 顯著變型； 燃料束彎曲及變形量測	用過燃料池	1: 可用來檢測結構損傷，且效果良好 2: 但用來檢測護套表面裂痕之效果有限
超音波檢測(UT)	燃料棒內的水	用過燃料池	可靠度 99%；一次測量整束燃料
渦電流檢測 (ECT)	缺陷； 氧化層厚度	用過燃料池	必須拆卸燃料束 (氧化層厚度量測— 可不需拆卸燃料束)
渦電流檢測 (ECT) — rod control cluster assembly	表面缺陷	用過燃料池	檢測控制棒表面缺陷效果良好
外徑量測 Profilometry	局部腐蝕或氫化造成的外徑變化； 氧化層厚度	用過燃料池	必須拆卸燃料束
燃料束耐荷重測試	結構完整性		利用拉伸速率及施加總力來判斷燃料束是否維持完整狀態

### 3.1.3 非標準處理方式

非標準處理方式需根據以下條件選擇適當的方式: (A)缺陷類型及大小; (B)功能是否受到影響; (C)是否希望與完整的用過核子燃料一同處理。IAEA 提出了 15 種非標準處理方式，本報告僅摘要其中與用過核子燃料乾式貯存相關之 6 種處理方式，分別為裝罐(Canning)、更換或修復受損結構性燃料組件(Replace and/or repair damaged structural fuel assembly components)、增加結構性支撐組件(Supplemental structural support)、燃料棒更換(Rod replacement)、燃耗效應(Brunup credit)及改變貯存條件(Change storage conditions)。

#### 1. 裝罐 Canning (Can)

裝罐為最常使用也最為大眾接受來處理破損燃料的方法，當受損燃料裝入貯存罐後，其在臨界度、密封度及運轉上的功能皆由此貯存罐來滿足，且貯存罐的設計要符合能以正常吊卸方式(例如吊車)來操作。

貯存罐有兩種方式，第一種是將受損燃料束及所有放射性物質完全密封在罐內，第二種則是開放但外加上端塞的方式將大多數的燃料微粒包覆在其中。

#### 2. 更換或修復受損結構性燃料組件 Replace and/or repair damaged structural fuel assembly components (StrucRep)

此方式是將具有缺陷的結構性燃料組件更換成一組新的組件，以滿足其基本功能需求。

#### 3. 增加結構性支撐組件 Supplemental structural support (StrucSup)

與上述的更換方式不同，此方式在受損的燃料束結構上增加機械強化組件來維持其強度，以承受貯存、運輸過程所產生的荷重，並可以正常吊卸方式操作。

#### 4. 燃料棒更換 Rod replacement (RodRep)

若燃料束具有燃料棒護套缺陷，但其結構組件仍維持完整，可執行燃料束修復作業，將受損的燃料棒移除再放入模擬棒(不鏽鋼棒)，此未照射的不鏽鋼棒將不會影響燃料結構穩定性且對於輻射及熱傳方面影響可經計算獲得。

#### 5. 燃耗效應 Brunup credit (BUC)

燃料效應是一種潛在解決臨界控制問題的方式，例如運送一批具有結構性組件受損、燃料束組件缺失或燃料棒碎片缺失，燃料效應必須依照不同事件情況分別計算應用。

#### 6. 改變貯存條件 Change storage conditions (SC)

如果燃料束及其組件在貯存環境中無法滿足安全上及運轉上的功能要求，就可能會被歸類於受損燃料。然而，貯存環境條件亦可調整來配合燃料現況，例如一根具有微小破洞的燃料棒在高溫高氧環境中會因氧化或釋放分裂微粒而歸類為受損燃料，但在低溫或惰性氣體環境中則可能被視為未破損燃料。這個方式對於乾式貯存可能具有缺陷或裂縫的燃料護套是很有用的。

不同的燃料破損類別與維持不同的功能所需採取的非標準處理方式亦不同，如下表 3.1.2 所示。

表 3.1.2 非標準處理方式 VS. 缺陷種類

缺陷種類	臨界控制	操作/運轉
<b>燃料束結構</b>		
爐屑	Can, BUC	Can
顯著變型	Can, BUC, StrucSup	SC, Can
組件缺失	Can, BUC, StrucSup	Can, StrucRep
未密封性質	Can, BUC, StrucSup	Can
<b>燃料棒/護套</b>		
未密封性質	Can, BUC	Can
爐屑	Can, BUC	Can
燃料棒元件缺失	Can, BUC, RodRep	NA
顯著裂縫	Can, BUC	Can
小破孔	Can, BUC	NA

### 3.2 美國破損燃料乾式貯存安全管制法規

美國聯邦法規 10 CFR Part 72 對於用過核子燃料貯存必須滿足以下安全要求：

- (1) 確認輻射劑量低於法規限值。
- (2) 在貯存條件下維持次臨界(Sub-Criticality)狀態。
- (3) 確認用過核子燃料在貯存時能滿足密封需求(Adequate Confinement)。

而美國核能管制委員會(NRC)針對 10 CFR 71 及 10 CFR 72 中關於用過核子燃料乾式貯存等相關規範訂定了過渡時期專家審查指導方針(Interim Staff Guidance Document, ISG)。而其中針對破損用過核子燃料乾式貯存方面則有 ISG-1 Rev.2 及 ISG-11 Rev.3 兩份管制審查指導方針，主要著重於藉由限制燃

料護套表面溫度來維持護套完整性及要求在特殊情況下使用特殊設計的破損燃料貯存罐。

ISG-11 Rev.3 規定正常乾貯及乾燥情況下燃料護套溫度限值為 400°C，而異常及意外情況下護套溫度限值為 570°C。

ISG-1 Rev.2 提供審查者在乾式貯存或運送前，用過核子燃料的分類指引，包含破損(damaged)、未破損(undamaged)及完整(intact)，並確保破損燃料於乾式貯存或運送時幾何形狀的完整性。其應用於乾式貯存系統及運送罐之審查，包含 NUREG-1536 “乾式貯存護箱系統標準審查計畫 Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems” (Jan. 1997)；NUREG-1567 “用過核子燃料乾指貯存設施標準審查計畫 Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities” (Mar. 2000) 或 NUREG-1617 “用過核子燃料運送罐標準審查計畫 Standard Review Plan for Transportation Packages for Spent Nuclear Fuel” (Mar. 2000)。

ISG-1 Rev.2 規範給予破損/非破損/完整燃料等相關定義，如下列所示：

- (1) 用過核子燃料(Spent Nuclear Fuel, SNF)：參考聯辦法規 10 CFR Part 72.3 的定義
- (2) 破損用過核子燃料：任何無法符合燃料設計或系統相關功能的燃料棒或燃料束
- (3) 未破損用過核子燃料：可以符合燃料設計或系統相關功能的用過核子燃料。如圖 3.2.1 所示，未破損用過核子燃料有可能具有裂縫。被歸類於未破損燃料可能會有“燃料束缺陷”。
- (4) 破裂用過核子燃料棒：用過核子燃料棒的護套具有缺陷，會讓分裂氣體由燃料棒內部外洩，其裂縫大小亦可能讓燃料微粒洩漏至外部。一個破裂可能是一個針孔破損或髮絲裂縫或是顯著破裂。

- (5) 針孔破損或髮絲裂縫：不會造成顯著微粒外洩之微小的護套缺陷且在燃料吊運或再取出作業中並未造成影響
- (6) 顯著破裂燃料棒：具有大於針孔破損或髮絲裂縫的破裂，一個可接受的判別方式是若能利用目視檢驗方式透過此裂縫看到燃料丸表面或是反應器運轉資料顯示有重金屬同位素釋出都可定義此燃料棒具有顯著破裂。
- (7) 完整用過核子燃料：可符合燃料設計或系統相關功能且未具有破裂之用過核子燃料。注意所有的完整用過核子燃料皆為未破損，但未破損用過核子燃料卻不一定是完整。
- (8) 破損燃料貯存罐：用來裝填一個受損燃料的金屬包材，必須能滿足與未破損燃料相同的燃料設計及系統相關法規要求之功能。
- (9) 燃料束缺陷：任何除了燃料棒輻射成長及燃料束彎曲之外的物理變型。例如：(a) 燃料棒缺失；(b) 燃料格架或間隔板斷裂或缺失；(c) 格架彈簧缺失或斷裂等。一束具有缺陷的燃料僅有在未能滿足法規要求之燃料設計與系統相關功能時才會被歸類為破損燃料。

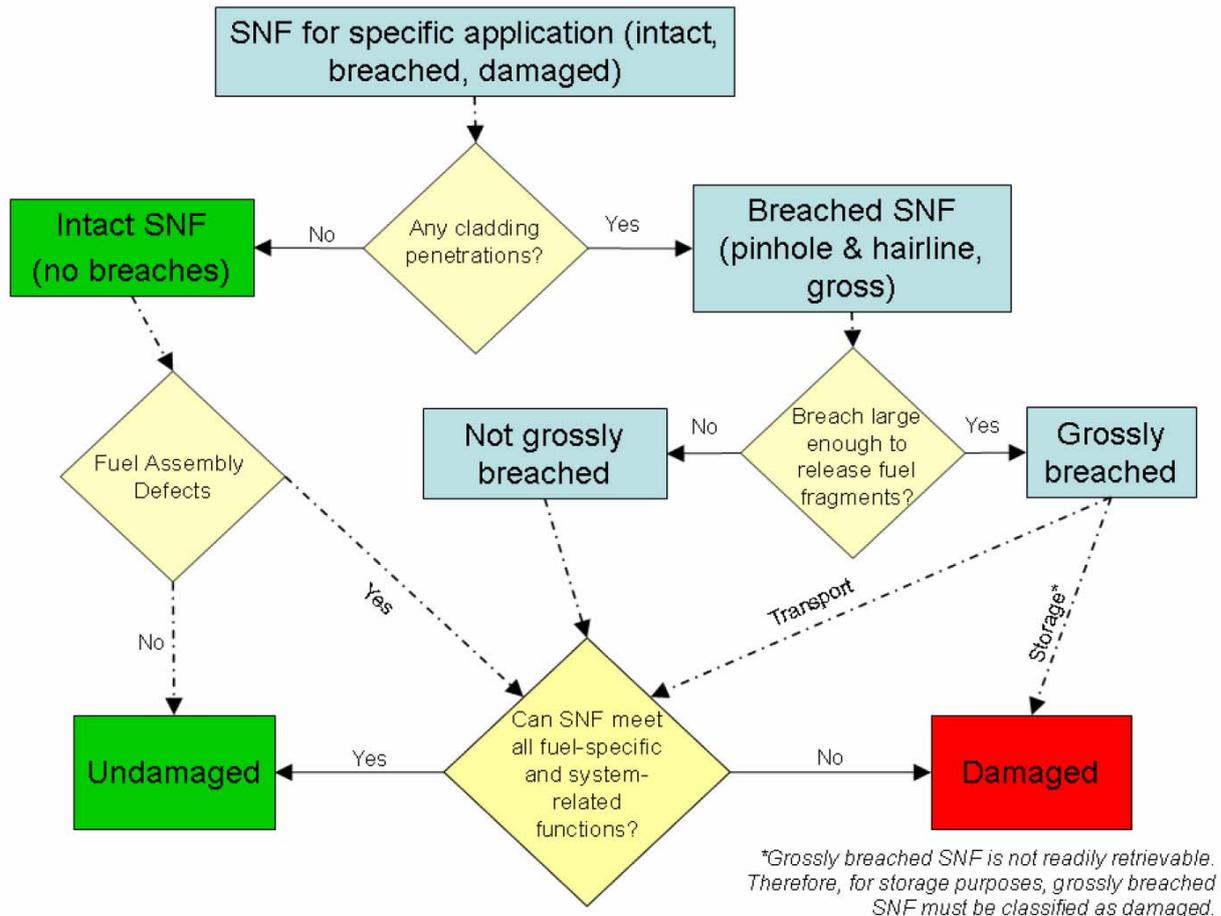


圖 3.2.1 用過核子燃料關係圖

而 ISG-1 中引述 ANSI N14.33-2005 對於破損用過核子燃料之定義，並指出若待進行貯存或運送的用過核子燃料具有下列其中一項燃料破損特徵即可歸類為破損燃料(Damaged Fuel)：

- (1) 具有明顯變型燃料棒。注意：不包含在反應器運轉時造成的均勻彎曲。
- (2) 具有燃料棒缺失。注意：若此束燃料以模擬棒(Dummy Rod)置換替代則可歸類為完整燃料(intact fuel)
- (3) 具有缺失、移位或破損之結構組件，例如
  - (a) 放射性和/或臨界安全已被廣泛影響(例如明顯地改變燃料棒間隙)
  - (b) 無法利用正常吊卸方法搬運 (例如吊車)

- (4) 反應器運轉資料(或其他資料)指出其具有顯著破裂之燃料棒
- (5) 不再具備完整燃料束之型態(例如含有爐屑、鬆脫燃料丸或燃料棒分段)

比較 ISG-1 與 ANSI 對於破損燃料的定義可推得，ISG-1 對於破損燃料貯存方面提供更多的彈性，只要能夠符合燃料設計及系統相關功能的燃料束即可歸類為未破損燃料。例如，在 ANSI N14.33 中，燃料束若有一根燃料棒缺失即歸類為破損，然而根據 ISG-1 的定義，若計算分析得到此燃料棒缺失未影響燃料設計與系統相關功能(如維持次臨界狀況、可再取出及結構性質未受影響)，此束燃料可定義成未破損燃料。另外，根據分析討論結果，ISG-1 描述若一護套裂縫寬度大於 1mm 則稱為顯著破裂。

根據 ISG-1 文件描述，當一燃料束或燃料棒的材料性質或可能的物理條件在運轉照射、貯存或運輸期間發生變化，且經過分析評估後，此變化會影響燃料束在貯存、運輸或兩者情況下，執行燃料特定或系統相關功能時，此束燃料視為破損燃料。

根據 ANSI N14.33-2005，破損用過核子燃料可分成下列幾類：

- Cladding Damage, Level 1: 燃料護套具有大於針孔或髮絲裂縫的缺陷，但燃料束本身仍維持完整。
- Cladding Damage, Level 2: 用過核子燃料已不再是燃料束的型式且含有爐屑、鬆脫的燃料丸與分裂產物、及燃料棒斷段等。
- Fuel Assembly Mechanical Damage: 燃料束具有結構性的受損，因此無法以正常方式吊運。
- Pinhole and Hairline Crack: 燃料護套缺陷相當小且沒有明顯數量的分裂產物逃逸的現象與潛在性。

ANSI N14.33-2005 亦提供了一個判斷燃料是否破損的流程圖，如圖二所示。

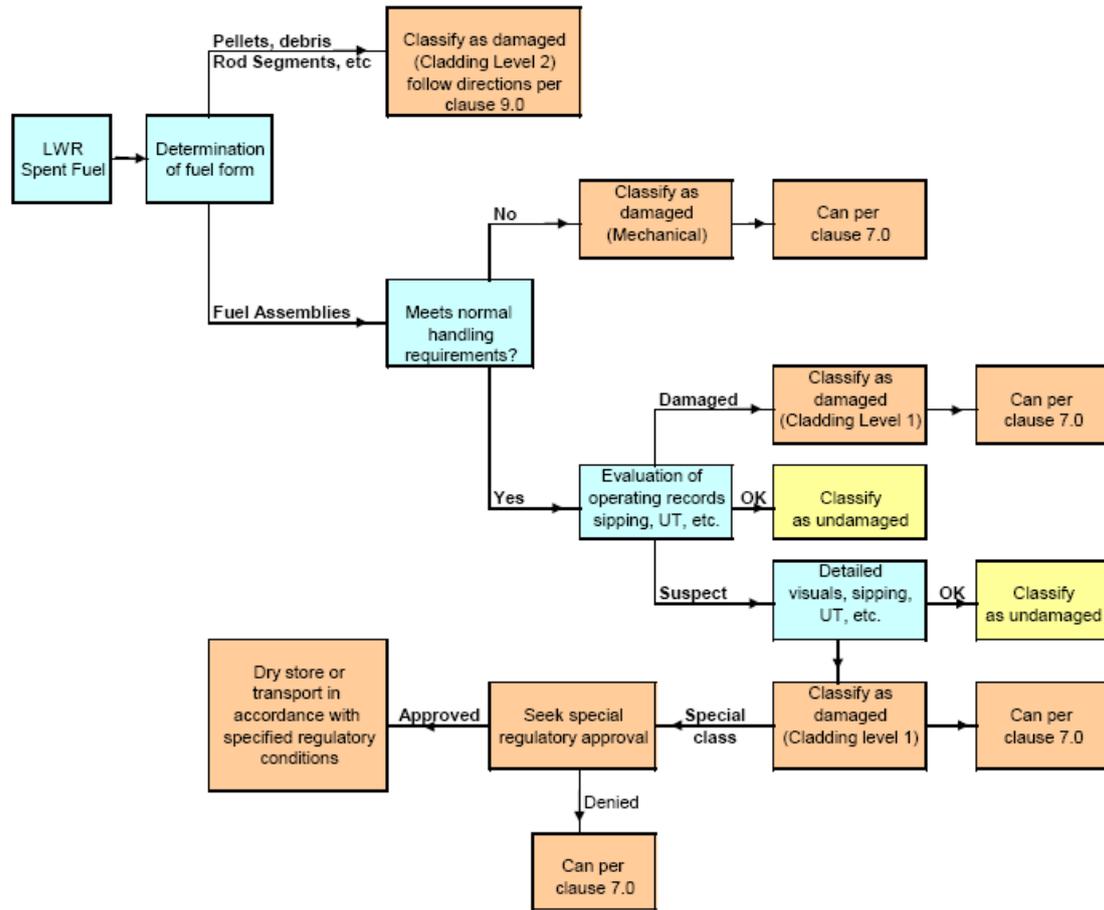


圖 3.2.1 破損燃料分類流程圖

目前美國 NRC 核准的破損燃料乾式貯存方式有兩種，第一種也是最通用的一種是將破損燃料束或其碎片放置在破損燃料貯存罐(can)內，其目的是限制釋出的分裂產物、燃料碎片或破損燃料束於一已知的體積內並確保其符合臨界、屏蔽及散熱的管制要求。另外，如果有多個破損燃料貯存罐放至於同一個乾貯筒(cask)內，貯存罐應具有中子吸收材料已確保臨界安全。

第二種 NRC 核准的貯存方法是由 Transnuclear(AREVA-TN)提出，將裝載破損燃料的燃料提籃兩端加上不鏽鋼端塞(end caps)，來隔離此燃料提籃內的分裂產物移轉到其他燃料提籃，以確保其符合臨界、屏蔽及散熱的管制要求。但需考量的一點是若為變形的破損燃料是否能夠裝載入相同尺寸的燃料提

籃。

### 3.3 國際破損燃料乾式貯存案例蒐集

破損用過核子燃料根據各國管制單位要求、技術可行性及其位於核燃料循環的不同階段而會有不同的處理方式，例如濕式貯存、乾式貯存、運送、永久處置或再處理。不同國家對於破損燃料的定義與處理方式皆不太相同，將找到的相關資料整理為表 3.3.1 所示。

目前在國際間，破損用過核子燃料乾式貯存的案例並不多，很多資料皆為廠家或電廠機密文件，僅能在部份期刊或會議論文中找到少許資料。

根據 IAEA 文件，破損用過核子燃料進行乾式貯存最常用的方式就是裝罐，其目的是將無法滿足應具備功能的用過核子燃料，外加封罐來替代，而外加封罐的設計必須能夠確保破損燃料未來可以利用正常吊卸方式進行再取出作業，但是每一個乾式貯存護箱內僅能裝填特定數量的破損燃料貯存罐且應考慮加裝中子吸收材料以維持次臨界狀態。

目前美國乾式貯存系統廠商主要有三家：Holtec 公司、AREVA-TN 公司及 NAC 公司，分別都有針對破損用過核子燃料進行外加貯存罐設計並獲得美國核能管制委員會(NRC)核准，其分別為：Holtec HI-STORM MPC-68M model、Transnuclear NUHOMS 24PHB DSC/ 32PTH2、NAC MAGNASTOR/MAGNATRAN Transport Cask。

英國則是將破損燃料分成”Failed”及”Damaged”兩個類別，Failed 是燃料束中有護套裂縫或是端塞受損情況；Damaged 則是燃料束幾何變形嚴重可能導致安全上或吊卸上的問題。由於英國的用過核子燃料管理策略採再處理，因此雖然英國有少數的 Damaged 輕水式反應器用過核子燃料(結構上受損)及極

少數的 Failed AGR 燃料(護套受損)，但僅有將 AGR 破損燃料送到熱室裝罐後再送至 Sellafield 再處理廠進行再處理作業

破損用過核子燃料實際執行乾式貯存的案例僅蒐集到美國 LaCrosse BWR 電廠-155 束破損燃料及美國三哩島電廠 2 號機，皆採用 NAC 所設計的破損燃料乾貯罐設計，但缺乏詳細資料，規劃中的則有 Catawba 電廠、McGuire 電廠及 Zion 電廠，Zion 電廠的用過核子燃料貯存管理於 4.3.1 節有較多說明。

表 3.3.1 國際破損燃料定義與處置方式

國家	破損燃料定義	處理方式
美國	具有比小破洞(pinhole)或髮絲裂縫(hairline crack)大的缺陷，詳細請參考 ISG-1 Rev.2 文件	乾式貯存時需放入特殊罐子中
德國	具有任何缺陷	破損燃料不得乾式貯存
英國	沒有明確定義缺陷大小，除非是很明顯全面的缺陷	裝罐後送到再處理廠
烏克蘭	主要區分為燃料棒是否有分裂氣體釋出或進水，護套完整性共分為 4 類，缺陷則分成 12 類型	
斯洛維尼亞	根據是否有分裂氣體釋出	
保加利亞	根據啜吸檢驗結果判斷是否有破損	貯存於密封容器內

## 4. 國際用過核子燃料乾式貯存技術規範最新發展

### 4.1 美國延期貯存合作計畫(Extended Storage Collaboration Program, ESCP)

美國的用過核子燃料數量趨勢預估如圖 4.1.1 所示，2010 年美國已經有 65,000MTU 用過核子燃料，2025 年達到 96,000MTU，2050 年則將達到 133,000MTU，且由於最終處置計畫延期及用過燃料池容量不足的因素，乾式貯存的比例將會逐年提高，預估在 2030 年會有超過 70 乾式貯存場址，2025 年有 3,700 個乾貯護箱，2050 年則增加至 9,500 個乾貯護箱。

2012 年 9 月最新資料顯示美國共有 1,650 個乾貯護箱，共貯存 65,261 束用過核子燃料，其中有 1,141 個為多用途乾式貯存護箱，詳細廠家數據如圖 4.1.2~4.1.4 所示。

由於美國的用過核子燃料乾式貯存年限經預期有可能會超過一世紀(目前美國核管處 NRC 所核可的最長乾式貯存場執照為 60 年)，因此美國電力研究所(EPRI)在 2009 年 11 月成立了延期貯存合作計畫(ESCP)計畫，成員包含管制單位、政府機關、電力公司、後端廠家等，並廣邀世界各國參與相關研究計畫，參與項目如下表 4.1.1。

此計畫共分成三階段。第一階段期間，與會者將檢討當前用過核子燃料儲存技術基礎，並進行差距分析來獲得現有儲存系統分析涵蓋期間的通盤了解；確認現有的資料和運轉議題；確認“open”議題（如“gap”）並提供填補差距的建議途徑。在第二階段，此計畫將針對以確認所需解決的差距來進行協調實驗，實地研究與額外分析。第三階段，該方案將協調合作研究計畫進行至少裝載一個高燃耗用過核子燃料的乾式貯存系統。

目前第一階段部分已初步完成，三個政府機構及美國電力研究所分別提出差異分析報告(gap analysis)，如下所列：

- (1)美國能源部－“Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel (Rev. 0)” (DOE-NE, 2012)
- (2)美國核廢料技術審查委員會－“Evaluation of the Technical Basis for Extended Dry Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel” (NWTRB, 2010)
- (3)及美國核能管制委員會－“Identification and Prioritization of the Technical Information Needs Affecting Potential Regulation of Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel” (NRC, 2012)，
- (4)美國電力研究所(EPRI)－“ESCP Progress Report and Review of Gap Analyses”

其中內容雖有不同，但皆同意下列為延期貯存與後續運送最重要的三項技術研發。

- (1)潛變及氫化物重排對高燃耗用過核子燃料護套長期劣化影響
- (2)不銹鋼銲接貯存罐之腐蝕
- (3)屏蔽及結構混凝土之劣化

國際上參與 ESCP 計畫的國家也對於延期貯存所需要的差異研究提出看法，本報告摘要如表 4.1.2 及表 4.1.3。由於各國地理環境、燃料設計或乾式貯存系統不同之因素，故關注的差異研究議題也不盡相同，附表中的低、中、高代表該國對於此研究議題之優先度分類。例如，日本目前採用的乾式貯存系統設計為金屬螺栓護箱，故對於螺栓/密封墊疲勞議題較為重視，而美國是採用焊接密封護箱，相同議題的分類則為中等。此資料可作為後續我國長期乾式貯存擬訂研究發展方向之參考。

美國核能業者也提出 DOE 對於用過核子燃料延期貯存能夠採取的行動如下所列

- (1) 提供研究發展所需的大部分經費，但保持與業界合作
- (2) 持續與業界合作以取得高燃耗用過核子燃料特性及長時間運送對於燃料行為影響
- (3) 提供一新研究設施，如 INL 國家實驗已除役之熱室，可對於貯存高燃耗用過核子燃料之全尺寸乾式貯存筒進行確認測試等相關研究 或者提供濕式或“小尺寸” approach
- (4) 研商用於實驗中的用過核子燃料所有權移轉議題
- (5) 必須擁有一個應變計畫，可用以發展、核准及證明一個或多個可與既有設施相容的用過核子燃料移轉系統

美國核能管制委員會於 2010 年開始針對用過核子燃料長期貯存管制法規與現行中期乾式貯存法規，進行一連串的差異分析工作，並提供研究計畫來支援其所需要的技術基礎。這些研究計畫包含用過核子燃料貯存系統之老化管理、高燃耗燃料之貯存與運輸及長期貯存護箱驗證計畫。2010 年 6 月，美國核管會經國會同意，針對用過核子燃料延期貯存與運輸(Extended Storage and Transportation, EST)議題，執行一個 10 年期的延期貯存與運輸管制法規審查計劃(2011~2020)，其主要目標有二：第一個是於現有技術基礎下，針對執照申請、監測及安裝工作，有效率的確認及實施近程管制法規改善；第二個是增強現有的技術及法規管制基礎來支援延期貯存與運輸工作。(NRC 2010b)

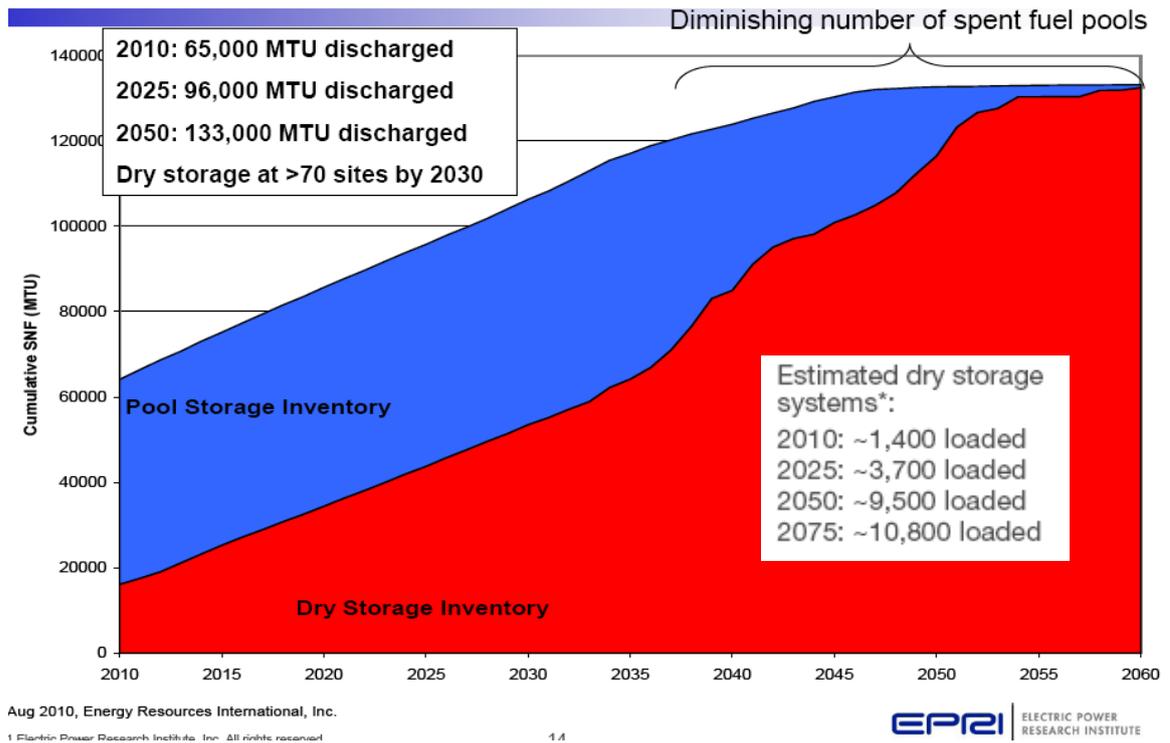


圖 4.1.1 破損燃料分類流程圖

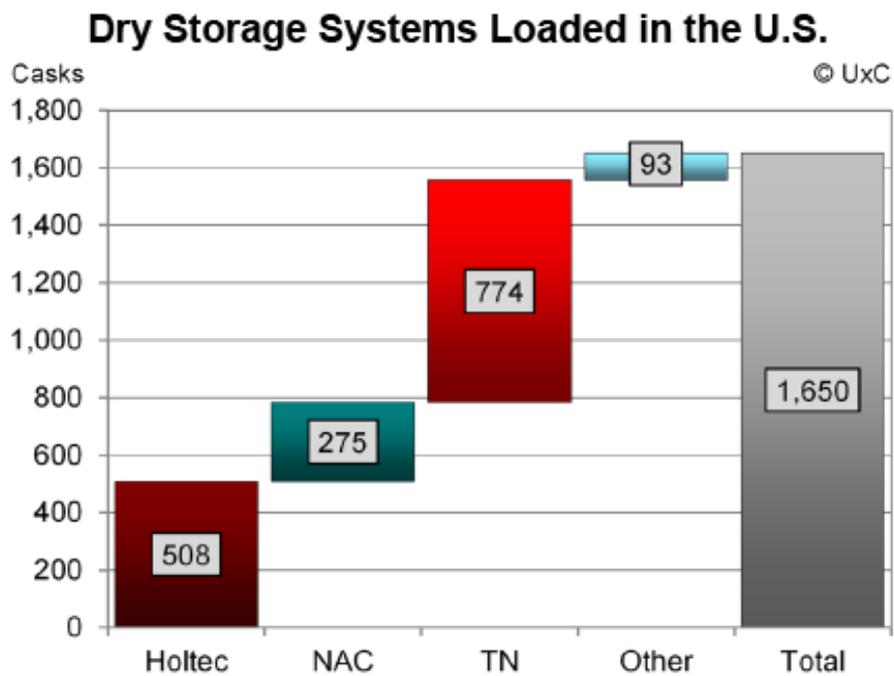


圖 4.1.2 美國乾式貯存護箱分佈圖

### Assemblies in Dry Storage in the U.S.

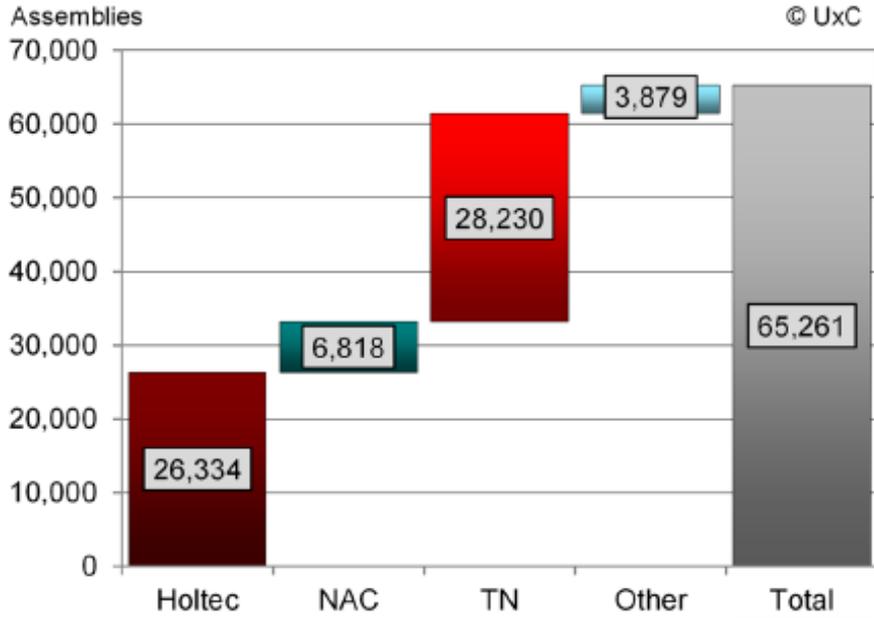


圖 4.1.3 美國乾式貯存之用過核子燃料數量分佈圖

### Dual Purpose Concrete Systems Currently Deployed

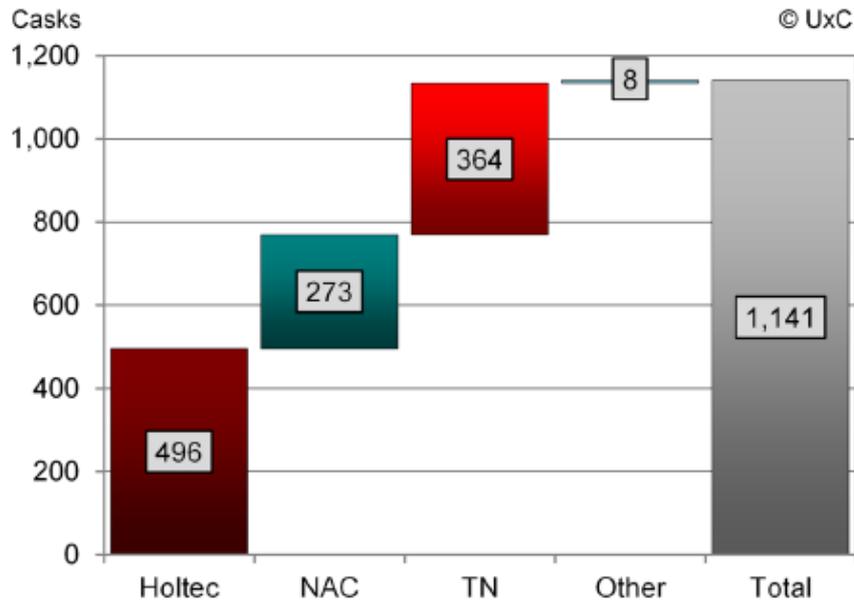


圖 4.1.4 美國多用途乾式貯存護箱分佈圖

表 4.1.1 美國延期貯存合作計畫參與國家與研究主題

	Fuel <sup>o</sup>	Internals/ <sup>o</sup> Canister <sup>o</sup>	Overpack/ISFSI <sup>o</sup>	Transportation <sup>o</sup>
<b>Germany</b>	◆ See "Transportation" cell <sup>o</sup>	◆ Corrosion of containment boundary components <sup>o</sup> ◆ Polymer neutron poison degradation <sup>o</sup>	◆ Degradation of metal and elastomer seals <sup>o</sup>	◆ Retrievability and subsequent transport of fuel after VLTS <sup>o</sup>
<b>Japan<sup>o</sup></b>	◆ Degradation performance of MOX fuel <sup>o</sup>	◆ Degradation data for normal SS under a realistic salty air environment with/without reduced residual stress <sup>o</sup>	◆ Degradation on loss of water content in shielding overpack <sup>o</sup>	◆ Evaluation method on containment performance of aged metal <sup>o</sup>
<b>Hungary</b>	◆ Corrosion <sup>o</sup> ◆ Creep <sup>o</sup>	<sup>o</sup>	◆ Concrete structure degradation <sup>o</sup>	◆ Retrievability to transfer into transport cask <sup>o</sup>
<b>U.S.<sup>o</sup></b>	◆ Hydride embrittlement <sup>o</sup> ◆ Delayed hydride cracking <sup>o</sup> ◆ Annealing of radiation effects <sup>o</sup> ◆ Oxidation <sup>o</sup> ◆ Creep <sup>o</sup>	◆ SCC on canister welds <sup>o</sup> ◆ de-watering effectiveness <sup>o</sup> ◆ neutron poison degradation <sup>o</sup>	◆ Concrete degradation (marine environments) <sup>o</sup> ◆ Closure lids, seals, bolts <sup>o</sup>	◆ Fuel retrievability <sup>o</sup> ◆ Clad integrity of high burnup fuel after storage <sup>o</sup> ◆ Kinetic energy transfer to fuel from normal condition loadings <sup>o</sup>

表 4.1.2 延期貯存所需技術差異研究主題-應力腐蝕破裂(SCC)

結構、系統、組件	劣化機制	德國	匈牙利	日本	南韓	西班牙	英國	美國
護套	退火		中等	高	中等	中等	高	中等
	H <sub>2</sub> 氫脆		高		高	高	高	高
	H <sub>2</sub> 氫化物裂縫		中等		高	中等	高	高
	氧化	中等	中等		中等	高(剝落)	高	中等
	潛變	中等	中等		中等	中等	高	中等
	高燃耗燃料 MOX 燃料	中等						
燃料丸	破裂、結合			高	低	中等		
燃料束硬體	腐蝕		中等					中等
提籃	腐蝕、照射	中等						
中子吸收材料/屏蔽	熱老化	中等			中等	中等		中等
	潛變					中等		中等
	脆化					中等		中等
	腐蝕					中等		中等
銲接密封鋼筒	大氣腐蝕		高	高	高	低	高	高
	濕氣腐蝕		高	高			高	高
濕氣吸收劑	照射、thermal	中等						
螺栓護箱	螺栓/密封墊疲勞	高		高	高			中等
	大氣腐蝕	中等						高
	濕氣腐蝕							高
金屬提籃	潛變	高						
外包裝/護箱	Freeze-thaw	低	中等		中等	低	高	中等
	腐蝕	低	中等					中等

表 4.1.3 延期貯存所需技術差異研究主題- 跨領域(Cross Cutting)

Cross Cutting	德國	匈牙利	日本	南韓	西班牙	英國	美國
監視 (Monitoring)	中等	高	高			高	中等-高
溫度曲線 (Temperature Profile)	中等	高		高	中等	高	高
Drying 議題 (Drying issues)	中等	高			中等 (護箱內 部壓力 曲線)	高	高
次臨界、燃耗效應 (Subcriticality, burnup credit)		高					高
燃料移轉選項 (Fuel transfer options)		高		中等	中等		高
燃料狀態確認 (Verification of fuel conditions)			高		中等	高	
檢驗 (Examination)		高				高	
密封鋼筒焊道應力 腐蝕破裂 (Canister weld SCC)			高			高	
燃料分類 (Fuel classification)				高	高		
“破損燃料”定義 (“Damage” definition)				高	高	高	

## 4.2 美國乾式貯存管制技術最新發展動向

### 4.2.1 美國聯想法規 10 CFR 71 與 72 整合

根據美國藍帶委員會所提出的建議—「開發一處以上的集中貯存設施」，因此其用過核子燃料可能會採取新的另一種運作模式：首先暫時貯放於電廠內幾十年(水池或乾式貯存)，接著運送至集中貯存設施存放幾十年，最後再運送至最終處置場。而美國的用過核子燃料運送及乾式貯存分別由 10 CFR 71 與 10 CFR 72 聯想法規來管制，由於目前多用途(dual-purpose)乾式貯存罐設計應用越來越普遍，因此 NRC 也著手進行 10 CFR 71 與 72 整合之審查。然而，此項法規整合有三大關鍵領域需進行討論：(1)再取出性、燃料護套完整性及用過核子燃料的安全吊運操作；(2)用過核子燃料運送時的臨界安全特性與條件；(3)多用途乾貯罐護箱與組件於長期貯存後的老化管理與合格。其中再取出性方面，管制單位是單一燃料束的再取出，而核能業界則是希望為貯存罐為基準的再取出性，兩種方式的優缺點亦為廣泛討論的議題之一。

### 4.2.1 除役電廠用過核子燃料乾式貯存議題

除役電廠之獨立乾式貯存場執照議題—美國目前有 10 個獨立乾式貯存場是位於永久關閉或除役電廠場址中，其中有 4 個為特定場址執照，6 個為通用執照。這 6 個具有通用執照的獨立乾式貯存場，由於其根據的 10 CFR 50 核設施運轉執照及設施已隨著電廠關閉或除役而改變，但 10 CFR 72 法規上僅有說明通用執照會因為燃料移出乾貯場而自動失效，卻沒有指出當電廠除役後，乾式貯存的通用執照會自動轉換成特定場址執照或其他處置方式。因此 NRC 內部對於此議題進行討論及審查中。

### 4.3 美國除役核電廠用過核子燃料貯存安全管制

當一個電力公司決定永久關閉其核能電廠時，此設施必須進行除役工作，其中包含安全地停止運轉、移除放射性物質、降低廠址殘留的放射性符合法規標準及終止運轉執照。美國核管會對於核電廠除役工作有相當嚴格的管制法，然而針對用過核子燃料方面，並無明確的時程表或貯存規定，僅有規定當用過核子燃料永久移出反應器時，需提供一份書面報告送交核管會。除役電廠之用過核子燃料要暫時貯存於用過燃料池內或移至獨立式乾式貯存設施 (ISFSI) 為設施經營者之決定權。

美國核電廠有三種除役方式可供選擇：DECON、SAFSTOR 或 ENTOMB

- (1) DECON：在電廠永久停止運轉後，將受放射性污染的設備物、結構物、設施及土壤於短期內予以除污與拆移，使廠址殘留的放射性低於法規標準，而可終止電廠執照。
- (2) SAFSTOR：通常被認為是“延遲 DECON”，SAFSTOR 是將核能設施長期安全貯存後，再進行除污與拆除的工作。其整置準備期約需二年，貯存期約需數十年。貯存期間，電廠設施大多原封不動，但用過核子燃料自反應器移出，放射性液體由相關系統及設備處理與排放。經過放射性的衰減作用，長期貯存後，將大量減少污染物及放射性物質的體積
- (3) ENTOMB：將放射性結構物、系統以及設備封存於耐久性的圍阻屏障內（如混凝土），並對屏障結構做適當的維護及監測，直到放射性強度衰變低於法規標準及終止執照為止。到目前為止尚未有任一個美國核管會核准的核能設施選擇此方式。

設施經營者可以選擇上述一種或結合前兩種方式進行除役工作，例如將一部分的設施進行拆除或除汙，其他部分設施則維持在 SAFSTOR 階段。這個決定通常是取決於放射性廢棄物的永久處置設施是否已完成。根據美國核管會管制規定，除役工作必須在電廠永久終止運轉後的六十年內完成，唯有在考慮保護公眾健康與安全時才可向核管會提出延長申請。

美國核子設施的除役活動大致可分為三個階段：

(a) 初期作業階段 (Initial Activities Phase)：自決定永久停止運轉開始，至開始進行主要除役工作/安全貯存為止。其間主要活動包括永久停止運轉之聲明書 (Certification)、永久移空燃料之聲明書、停機後之除役作業報告書、以及除役作業報告書之公開說明會。

(b) 主要除役工作/安全貯存 (Major Decommissioning / Storage Phase)：主要工作為除汙、拆廠/安全貯存。其間應處理關於除役作業之人力規劃、運轉維護技術規範再評估、事故評估再分析、緊急計畫之修訂、安全防護計畫之更新、解除部份法規責任之要求、終期安全分析報告之更新、品質保證方案之更新、防火計畫之修訂、除役費用再評估、社區公共關係之建立等工作。

(c) 執照終止階段 (License Termination Phase)：終止執照前尚需完成的剩餘工作。其間主要活動包括終止執照的申請作業、執照終止計畫 (LTP) 的編訂、以及執照終止計畫之公開說明會。

針對用過核子燃料貯存安全管制規範方面，除了與用過核子燃料乾式貯存系統相關的幾份 NURGE 報告外(NUREG-1536 “乾式貯存護箱系統標準審查計畫”；NUREG-1567 “用過核子燃料乾指貯存設施標準審查計畫”；NUREG-1617 “用過核子燃料運送罐標準審查計畫”)，美國核管會亦發表了

述幾份報告，本計畫已完整蒐集這些報告，後續工作將進行內容研析並提供國內管制單位參考。

(1)NUREG-1738：Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants

(2)NUREG-1864：A Pilot Probabilistic Risk Assessment of a Dry Cask Storage System at a Nuclear Power Plant

(3)NUREG-2125：Spent Fuel Transportation Risk Assessment

#### 4.3.1 美國 Zion 核電廠除役用過核子燃料貯存管理經驗

美國 Zion 電廠原屬於 Exelon 電力公司所擁有，一、二號機於 1998 年因經濟因素停止運轉之後，由於當時評估拆廠除役的費用超過其運轉期間累積的後端基金，無法進行除役工作。後來 2010 年 9 月 Exelon 公司將 Zion 核電廠轉交 EnergySolution 子公司 ZionSolution 進行除役工作，美國核管會也將 Zion 電廠提撥的後端基金全部轉移給 ZionSolution 公司進行除役專款。因此 Zion 電廠自 2010 年開始執行除役工作，預計 2020 年原廠址的土地除了乾式貯存設施預定地外，除役並復育完成後再還給 Exelon 公司。

Zion 電廠一號機共運轉 15 週期，累積產生 1,125 束用過核子燃料，二號機共運轉 14 週期，累積產生 1,101 束用過核子燃料，電廠關閉後皆暫貯在用過燃料池中。因應其除役計畫，2,226 束用過核子燃料將會全數轉移至獨立式乾式貯存設施貯放，已選定 NAC MAGNASTOR/ MAGNATRAN 乾貯系統。

其預估時程如下所示

時間	任務執行內容
2011~2012	燃料特性調查、周邊吊運輸送裝置準備、路線整頓

2011~2013	乾式貯存鋼筒、混凝土護箱、乾式貯存場之建設等準備工作完成
2013~2014	燃料轉移至乾式貯存場

用過核子燃料在進行燃料移轉作業前，需根據 Exelon 壓水式核電廠運轉程序書、ZionSolutions 除役計畫書之規範，以及 Zion 核電廠運轉之相關文件紀錄，進行燃料特性調查與完整性評估工作。首先 ZionSolution 公司與西屋公司人員，以一個多月(2012 年 2 月中至 2012 年 3 月底)的時間完成每一束燃料的特性調查與目視檢驗工作，接著根據運轉歷史及目視檢驗結果來確認後續進行燃料池真空啜吸檢驗範圍。

燃料特性調查結果，Zion 核電廠共有 3 種西屋公司設計的 15x15 壓水式反應器(PWR)燃料束，其種類與數量分別為：1,122 束 LOPAR (Low parasitic) 燃料束、712 束 OFA(Optimized Fuel Assembly)燃料束、392 束 Vantages-5 燃料束。

根據調查與評估結果：8 束為運轉歷史紀錄記載有破損、6 束為超音波檢驗有疑慮者、43 束為燃料池真空啜吸檢驗發現、2 組燃料束外包覆有損傷，需放置入破損燃料貯存罐(damaged fuel can, DFC)後，再用特定的燃料貯存鋼筒密封貯存。

而 Zion 電廠於 1998 年停止運轉後，兩部機組共產生 201 束未耗乏 (under-burned)用過核子燃料，根據分析結果，這些未耗乏燃料可直接貯存於 MAGNASTOR 乾貯系統進行貯存。但由於無法通過運送意外事件臨界度分析計算，故無法透過 MAGNATRAN 乾式運送系統進行燃料運輸工作。為了解決這個問題，每一束未耗乏燃料將會與一束 Rod Control Cluster Assembly(RCCA) 放置於貯存鋼筒內。

另外，Zion 電廠共有 36 束燃耗超過 45Gwd/MTU 的用過核子燃料，與未耗乏用過核子燃料相同，無法透過 MAGNATRAN 系統進行運輸工作，為解決此問題，這 36 束高燃耗用過核子燃料將會放置於破損燃料貯存罐(damaged fuel can, DFC)再放置入乾式貯存鋼筒中貯存。

本計畫後續將持續追蹤 Zion 電廠用過核子燃料貯存資料更新，以期提供更多完整資料供管制單位參考。

## 5. 結論

本計畫第一年度工作完成國際用過核子燃料循環管理方案最新動態彙整分析、國際破損用過核子燃料乾式貯存管制法規研究、美國電力研究所延期貯存合作計畫工作報告研析、美國乾式貯存管制法規更新資訊及美國除役核電廠用過核子燃料貯存安全管制規範與案例蒐集。

日本 311 福島事件之後，各國對於用過核子燃料安全貯存與管理更為重視，根據匯整國際資訊，除法國採用再處理方式不變之外，其餘各國用過核子燃料/高放射性廢棄物的處置時程延宕，貯存時間延長，長期(延期)貯存成為一主要趨勢，由美國提出的國際合作，可達到整合國際資源，提供共同研究平台，讓福島事件後受限的核能資源有最大的利用價值。

由於美國藍帶委員會提出設置一處以上的集中貯存場址建議，使得用過核子燃料經過長期貯存後的運輸問題成為另一個關鍵議題，本計畫後續將持續蒐集國際間相關資訊及分析美國核管會之用過核子燃料運輸安全度評估報告(NUREG-2125)，冀能提供國內相關研究及管制單位參考應用。

破損用過核子燃料乾式貯存目前國際實際案例並不多，IAEA 與美國核管會所提出的判斷破損燃料準則及後續處理方式仍多屬於概念方式，並無明訂詳細規範。且因應我國後續可能的除役工作，用過核子燃料貯存安全與管理成為重點工作，美國 Zion 電廠規劃明後年將進行破損用過核子燃料裝罐乾貯作業，本計畫將蒐集後續裝罐相關資訊、研析美國核管會除役電廠用過燃料池潛在事件風險評估報告(NUREG-1738)及乾式貯存設施安全度評估報告(NUREG-1864)管制資訊，以提供我國管制機關最新的國際資訊，藉助國際經驗，作為國內後續安全管制之參考依據。

## 參考文獻

1. 行政院，1997，放射性廢料管理方針，中華民國八十六年九月二日，行政院台 86 科字第 33951 號令修正發布。
2. 原能會，2002，放射性物料管理法，中華民國九十一年十二月二十五日，華總一義字第 09100248760 號令公布。
3. 原能會，2003，放射性物料管理法施行細則，中華民國九十二年七月三十日，會物字第 0920018935 號函發文實施。
4. 原能會，2004，放射性廢棄物處理貯存最終處置設施建造執照申請審核辦法，中華民國 93 年 4 月 7 日實施。
5. 原能會，2005，申請設置用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告導則，中華民國 94 年 10 月 28 日實施。
6. 台電公司，2009 核一廠用過核子燃料乾式貯存設施-燃料完整性評估與檢驗計畫書
7. 核能研究所，2011，紀立民，國際用過核子燃料管理現況分析，INER-8103
8. 核能研究所，2008，施建樑，核設施除役法規需求探討，INER-5375R
9. ANSI, 2005, Characterizing Damaged Spent Nuclear Fuel for the Purpose of Storage and Transport”, ANSI-N14.33
10. ASN , 2011, Fourth National Report on Compliance with the Joint Convention Obligations - Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Nuclear Safety Authority (ASN),

France.

11. Canana, 2011, Canadian National Report for the Joint Convention for the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management - Fourth Report, Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC) , Government of Canada
12. DECC, 2011, National Policy Statement for Nuclear Power Generation (EN-6)
13. EC, 2011, Establishing a Community framework for the responsible and safe management of spent fuel and radioactive waste, Official Journal of the European Union
14. EPRI, 2010, Industry Spent Fuel Storage Handbook, EPRI Report 1021048
15. EPRI, 2011, ESCP Progress Report and Review of Gap Analyses, ERPI Report 1022914
16. EPRI, 2012, International Perspectives on Technical Data Gaps Associated With Extended Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel, ERPI Report 1026481
17. IAEA, 2009, Management of Damaged Spent Nuclear Fuel, NF-T-3.6
18. IPFM, 2011, Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors - Experience and Lessons from Around the World, , International Panel on Fissile Materials
19. Japan, 2011, Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management - National Report of Japan for the Fourth Review Meeting.
20. MEST, 2008, Korean Third National Report under the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste

Management, Ministry of Education, Science and Technology (MEST), The Republic of Korea.

21. NWTRB, 2010, Evaluation of the Technical Basis for Extended Dry Storage and Transportation of Used Nuclear Fuel
22. NWMO, 2006a, Reactor site extended storage- Fact sheet, Nuclear Waste Management Organization, 4p.
23. NWMO, 2006b, Centralized extended storage- Fact sheet, Nuclear Waste Management Organization, 4p.
24. NWMO, 2010, Long-Term Spent Fuel Management in Canada, International Conference on SNF Management from Nuclear Power Reactors, 31<sup>st</sup> May ~ 4<sup>th</sup> June 2010
25. StoreFuel, 2012 August, Vol. 13 No. 168
26. StoreFuel, 2012 September, Vol. 13 No. 169
27. RWMAC, 2002, Managing Radioactive Waste Safely: Summary of Responses to the consultation, <http://www.scotland.gov.uk>.
28. UK, 2011, The United Kingdom's Fourth National Report on Compliance with the Obligations of the Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management, Health and Safety Executive (HSE), UK.
29. USBRC, 2012, Blue Ribbon Commission on America's Nuclear Future- Report to the Secretary of Energy
30. USDOE, 2002, Yucca Mountain science and engineering report DOE/RW-0539 Rev. 1, 942p.

- 31.USDOE, 2012, Gap Analysis to Support Extended Storage of Used Nuclear Fuel
- 32.USGNEP, 2006, The Global Nuclear Energy Partnership, <http://www.gneppartnership.org>
- 33.USNRC, 1997, NUREG-1536, Standard Review Plan for Dry Cask Storage System
- 34.USNRC, 2000, NUREG-1567, Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities
- 35.USNRC, 2000, NUREG-1617, Standard Review Plan for Transportation Packages for Spent Nuclear Fuel
- 36.USNRC, 2011, ISG-1 Rev2, Classifying the Condition of Spent Nuclear Fuel for Interim Storage and Transportation Based on Function
- 37.USNRC, 2003, ISG-11 Rev3, Cladding Considerations for the Transportation and Storage of Spent Fuel
- 38.USNRC, 2005, 10 CFR 72, Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel and High-Level Radioactive Waste
- 39.USNRC, 10 CFR 71, Packing and Transportation of Radioactive Material
- 40.USNRC, 2009, Update and final revision of Waste Confidence Decision.
- 41.USNRC, 2012, Identification and Prioritization of the Technical Information Needs Affecting Potential Regulation of Extended Storage and Transportation of Spent Nuclear Fuel
- 42.World Nuclear News(WNN), 2012, Court rejects NRC used fuel ruling ,

[http://www.world-nuclear-news.org/WR-Court\\_rejects\\_NRC\\_used\\_fuel\\_ruling-1106124.html](http://www.world-nuclear-news.org/WR-Court_rejects_NRC_used_fuel_ruling-1106124.html)

43. World Nuclear Association(WNA), 2012, Nuclear Power in Japan,  
<http://www.world-nuclear.org/info/inf79.html>