

核一廠用過核子燃料乾式貯存設施

(案號：94-009)

【燃料完整性評估與檢驗計畫書】

(文件編號：ISFSI-04-REP-06010-04)

台灣電力公司

中華民國九十八年九月廿九日

目錄

1. 前言	1
2. 依據	2
3. 範圍	5
4. 完整性評估規劃	7
4.1 燃料護套完整性	7
4.2 燃料結構完整性	9
5. 核子燃料完整性監測檢驗技術及分析	12
5.1 燃料運轉週期分析	14
5.2 核一廠燃料運轉紀錄分析－排氣監測及池邊檢驗紀錄分析	16
6. 額外抽樣檢測計畫	18
6.1 抽樣計畫驗證	19
6.2 抽樣計畫	19
6.3 抽樣樣本	23
6.4 檢驗時程	33
7. 品質保證	34
7.1 人員資格	34
7.2 人員訓練	34
8. 結語	35
參考文獻	36
附錄一 ISG-1	A-1

圖目錄

圖 1	燃料完整鑑識流程圖(ANSI N14.33).....	8
圖 2	核一廠乾式貯存燃料完整性鑑識流程圖	11

表目錄

表 1	核一廠 GE8×8-1 與 GE8×8-2 破損燃料明細表.....	6
表 2	核一廠一號機待運貯用過核子燃料退出週期、數量及破損資訊	15
表 3	核一廠二號機待運貯用過核子燃料退出週期、數量及破損資訊	15
表 5	燃料完整性抽樣檢驗各退出週期燃料數量及抽樣數	23
表 6	一號機第 2 週期抽樣檢驗燃料(16/256).....	24
表 7	一號機第 3 週期抽樣檢驗燃料(7/64).....	24
表 8	一號機第 4 週期抽樣檢驗燃料(10/112).....	25
表 9	一號機第 5 週期抽樣檢驗燃料(12/128).....	26
表 10	一號機第 6 週期抽樣檢驗燃料(12/132).....	26
表 11	一號機第 7 週期抽樣檢驗燃料(11/120).....	27
表 12	一號機第 8 週期抽樣檢驗燃料(4/28).....	28
表 13	二號機第 2 週期抽樣檢驗燃料(15/191).....	28
表 14	二號機第 3 週期抽樣檢驗燃料(13/140).....	29
表 15	二號機第 4 週期抽樣檢驗燃料(12/128).....	30
表 16	二號機第 5 週期抽樣檢驗燃料(12/132).....	30
表 17	二號機第 6 週期原規劃抽樣檢驗燃料(11/116)錯誤! 尚未定義書籤。	
表 18	二號機第 7 週期抽樣檢驗燃料(12/131).....	32
表 19	二號機第 8 週期抽樣檢驗燃料(4/29).....	33
表 20	用過核子燃料完整性額外抽樣檢驗時程.....	33

1. 前言

台電公司核能一廠自民國 67 年商轉，迄今已屆 28 年，歷年來其用過核子燃料皆貯存在原機組用過核子燃料池(Spent Fuel Pool)內，由於用過核子燃料池貯存容量已趨近額滿，為避免用過核子燃料池容量不足，影響電廠未來運轉，故決定將部份用過核子燃料改採用乾式貯存。核一廠定於民國 98 年起進行乾式貯存用過核子燃料裝載，兩部機組預估將完成 25 個混凝土護箱裝載，共計裝填至少 1366 束用過核子燃料⁽¹⁾。

本計畫書之目的在於評估待貯存燃料符合 ISG-1 未破損燃料(Undamaged Fuel)的定義，以確認燃料棒護套之完整性(Integrity)與可再取出(Retrievability)兩項基本需求。保持燃料棒護套完整性之目的在於防止大量放射性燃料微粒(Gross Fuel Particles)自燃料護套內洩漏出去；保持燃料束結構完整性之目的在於維持燃料貯存時次臨界狀態，以及避免在挪移時發生燃料墜落事件。

2. 依據

本計畫書依據我國放射性物料管理法⁽²⁾、放射性物料管理法施行細則⁽³⁾、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⁽⁴⁾、申請設置用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告導則⁽⁵⁾，並參考美國聯辦法規 10 CFR Part 72⁽⁶⁾、ISG-1⁽⁷⁾等規範，執行核子燃料乾式貯存待運貯用過核子燃料完整性檢驗計畫。

美國聯辦法規 10 CFR Part 72 關於用過核子燃料貯存相關法規具有以下安全目的：

- (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)。

10 CFR 72.124 和 72.236 要求在貯存狀態下所有可能的正常(Normal)和設計基準事件(Design Base Events)條件下，燃料幾何形狀必須維持，以確保次臨界狀況。

10 CFR 72.122(h)(1)、72.122(l)及 72.236(m)要求確認燃料貯存及吊卸安全，以降低往後從貯存系統再取出時操作上的安全問題。

另美國核能管制委員會(NRC)依據聯辦法規 10 CFR Part 72 中關於用過核子燃料貯存相關規範，訂定過渡時期專家審查指導方針(Interim Staff Guidance Document, ISG)，作為用過核子燃料貯存時之規範。其中 ISG-1 提供破損燃料之定義，破損燃料貯存與運送時如何處理程序，以及用過

核子燃料之破損或完整之分類指引。其可應用於乾式貯存系統及運送護箱之審查：包括 NUREG-1536⁽⁸⁾—乾式貯存護箱系統標準審查計畫、及 NUREG-1567⁽⁹⁾—用過核子燃料乾式貯存設施標準審查計畫等。

ISG-1, Rev.1 規範給予完整燃料定義，當用過核子燃料需進行貯存或運送之目的時，若具有下列燃料破損特徵即可歸類為破損燃料(Damaged Fuel)：

- (1) 燃料棒護套有大於針孔或髮絲般裂縫之破損，且可導致分裂產物及燃料微粒大量釋出至貯存護箱中者。
- (2) 燃料束(Fuel Assembly)：
 - (a) 損壞劣化(Damaged)以至於減弱結構完整性者；
 - (b) 格架等結構組件之缺失或移位者；
 - (c) 燃料棒缺失，且未以模擬棒(Dummy Rod)置換替代者；
 - (d) 不能使用正常吊卸方法搬運者。
- (3) 不完整的燃料束、或含多段燃料棒者。
- (4) 燃料束結構或護套材質呈現劣化情形，使得燃料無法禁得起正常貯存(針對貯存目的之護箱)，或正常及假設事故狀況運送所導致的燃料完整性疑慮者。
- (5) 燃料經研判呈現任何不利於輻射物質密封標準、臨界控制、維持屏蔽、劑量、熱限值、或貯存護箱設計之條件者。

核子燃料具有上述任何一種破損特徵，於長期貯存或運送時可能造成危及護套完整性或燃料束外觀幾何形狀重新排列等情形者，應歸類為破損燃料。

ISG-1, Rev. 1 亦提供完整燃料鑑識流程規範，用過核子燃料完整性評

估應先確認用過核子燃料之型式、數量、編號及相關資料，若用過核子燃料符合可正常吊卸作業之需求，則依據爐心運轉或檢驗紀錄評估其完整性。若有任何被判定為破損燃料或疑似破損燃料，將排除在乾式貯存待貯存及運送燃料之外。相關之 ISG-1 規範，請參考附錄一。

3. 範圍

核一廠用過核子燃料乾式貯存計畫執行範圍，以該廠貯存十年以上待運貯燃料為篩選基準，主要標的是 GE8×8-1 及 GE8×8-2 型核子燃料。GE8×8-1 型燃料使用於核一廠初始爐心，隨後第二週期至第五週期填換燃料為 GE8×8-2 型；核一廠一號機在第一至第五週期之置入燃料束數量計有 408 束 GE8×8-1 燃料及 432 束 GE8×8-2 燃料，總計共 840 束；核一廠二號機在第一至第五週期共置入燃料束數量計有 408 束 GE8×8-1 燃料及 460 束 GE8×8-2 燃料，總計共 868 束。

兩部機組總計有待運貯燃料標的 1708 束燃料，這兩型燃料已於第 8 週期末全部退出爐心，並貯存在用過核子燃料池超過廿年。早期使用之燃料，因燃料週期短、濃縮度低，相對之退出燃耗值也低，均不超過 35 GWD/MTU。排除在運轉時發生破損的 31 束，尚餘有 1677 束。燃料破損明細參見表 1⁽¹⁰⁾，其中在一號機 GE8×8-1 燃料有 2 束，共 5 支燃料棒破損，GE8×8-2 燃料有 9 束，共 11 支燃料棒破損，另有 1 束燃料編號 LJL145，其上端板受損；在二號機 GE8×8-1 燃料有 1 束 1 支燃料棒破損，GE8×8-2 燃料有 18 束，共 23 支燃料棒破損。

破損燃料束均已於各個週期末大修期間經過啜吸篩選，並將破損燃料棒自燃料束中挑出另行貯放，在本次乾式貯存將不處理這些曾經有破損經驗之燃料束。目前規劃兩個機組第一期貯存之燃料束數量為不少於 1366 束，依目前設計每個混凝土護箱可存放 56 束燃料，共需 25 個混凝土護箱，可存放至少 1366 束用過核子燃料。

表 1 核一廠 GE8×8-1 與 GE8×8-2 破損燃料明細表

機組	受損燃料編號	退出/填入週期	燃料型態	退出燃耗(MWD/MTU)	破損棒數目	破損棒編號	破損/受損原因
一號機	LJ1342	2 / 1	GE8×8-1	15,379	2	A03	ECC
	LJ1361	2 / 1	GE8×8-1	15,346	3	C01	HYD
						C01	HYD
						E01	HYD
	LJC848	2 / 2	GE8×8-2	8,375	1	F01	ECC
	LJC889	5 / 2	GE8×8-2	27,588	1	A04	ECC
	LJC921	5 / 2	GE8×8-2	27,452	1	E02	PCI
	LJL145 #	5 / 3	GE8×8-2	19,454	0	C05	PCI
	LJL102	6 / 3	GE8×8-2	33,264	1		UTD #
	LJL061	7 / 5	GE8×8-2	25,218	1	C01	PCI
	LJL052	8 / 5	GE8×8-2	32,767	1	D02	PCI
	LJL059	8 / 5	GE8×8-2	32,770	1	E02	UND
二號機					2	C07	HYD
						D02	HYD
	LJL073	8 / 5	GE8×8-2	29,865	1	A03	UND
	LJL169	8 / 5	GE8×8-2	29,652	2	A01	UND
						E02	UND
	LJ4892	1 / 1	GE8×8-1	9,053	1	G01	ECC
	LJL270	4 / 2	GE8×8-2	25,534	1	B02	HYD
	LJL286	4 / 2	GE8×8-2	27,207	1	C06	HYD
	LJL361	4 / 2	GE8×8-2	29,269	1	D02	HYD
	LJL301	5 / 2	GE8×8-2	32,187	1	D02	PCI
	LJL343	5 / 2	GE8×8-2	32,240	1	D02	PCI
	LJL498	5 / 3	GE8×8-2	24,480	1	B01	PCI
	LJL371	6 / 3	GE8×8-2	31,601	1	D02	PCI
	LJL414	6 / 3	GE8×8-2	30,184	1	D03	PCI
	LJL415	6 / 3	GE8×8-2	30,184	2	D02	PCI
						B04	PCI
	LJL416	6 / 3	GE8×8-2	30,203	1	D02	PCI
	LJL417	6 / 3	GE8×8-2	30,195	3	A01	PCI
						A02	PCI
						B04	PCI
	LJL526	6 / 4	GE8×8-2	25,466	1	A06	PCI
	LJL543	6 / 4	GE8×8-2	25,470	2	E01	UND
						E03	UND
	LJL549	6 / 4	GE8×8-2	25,458	1	D02	PCI
	LY1880	6 / 4	GE8×8-2	27,142	1	C03	PCI
	LY1888	6 / 4	GE8×8-2	27,144	2	B04	PCI
						D01	PCI
	LY1891	6 / 4	GE8×8-2	27,139	1	G01	PCI
	LY1893	6 / 4	GE8×8-2	28,338	1	A01	PCI

註：ECC：端塞銲道腐蝕、HYD：氫化、PCI：燃料丸護套作用、UTD：上繫板損壞、UND 已檢查，原因無法判定、#：燃料束受損，燃料棒無破損。

4. 完整性評估規劃

本計畫書參考 ISG-1, Rev. 1 規劃乾式貯存用過核子燃料完整性評估與破損燃料處理，做為用過核子燃料完整性檢測方法及判定標準規劃準則。另外 ANSI N14.33⁽¹¹⁾及 NEI Protocol⁽¹²⁾也提供類似之破損燃料鑑識流程，如圖 1 所示。

用過核子燃料束必須符合護套完整及結構完整的標準，才可以被歸類為完整燃料；若用過核子燃料束不能以正常作業方式吊運處理者，將被歸類為破損燃料，其餘可正常操作者，將研判爐心運轉資料，評估其是否符合規範需求，若符合規範且無任何破損現象，則可將燃料歸類為完整燃料。

破損燃料可以特殊容器封裝以符合運貯規定，但是在本計畫中，將直接排除在待運貯燃料目標之外。

4.1 燃料護套完整性

燃料護套完整性評估之依據包括紀錄評估分析或執行核子燃料檢驗。

4.1.1 紀錄評估分析

依據 ISG-1, Rev. 1 完整燃料鑑定程序，若爐心運轉紀錄及吊卸紀錄顯示燃料沒有任何洩漏或明顯異常現象，則用過核子燃料可被歸類為護套完整。

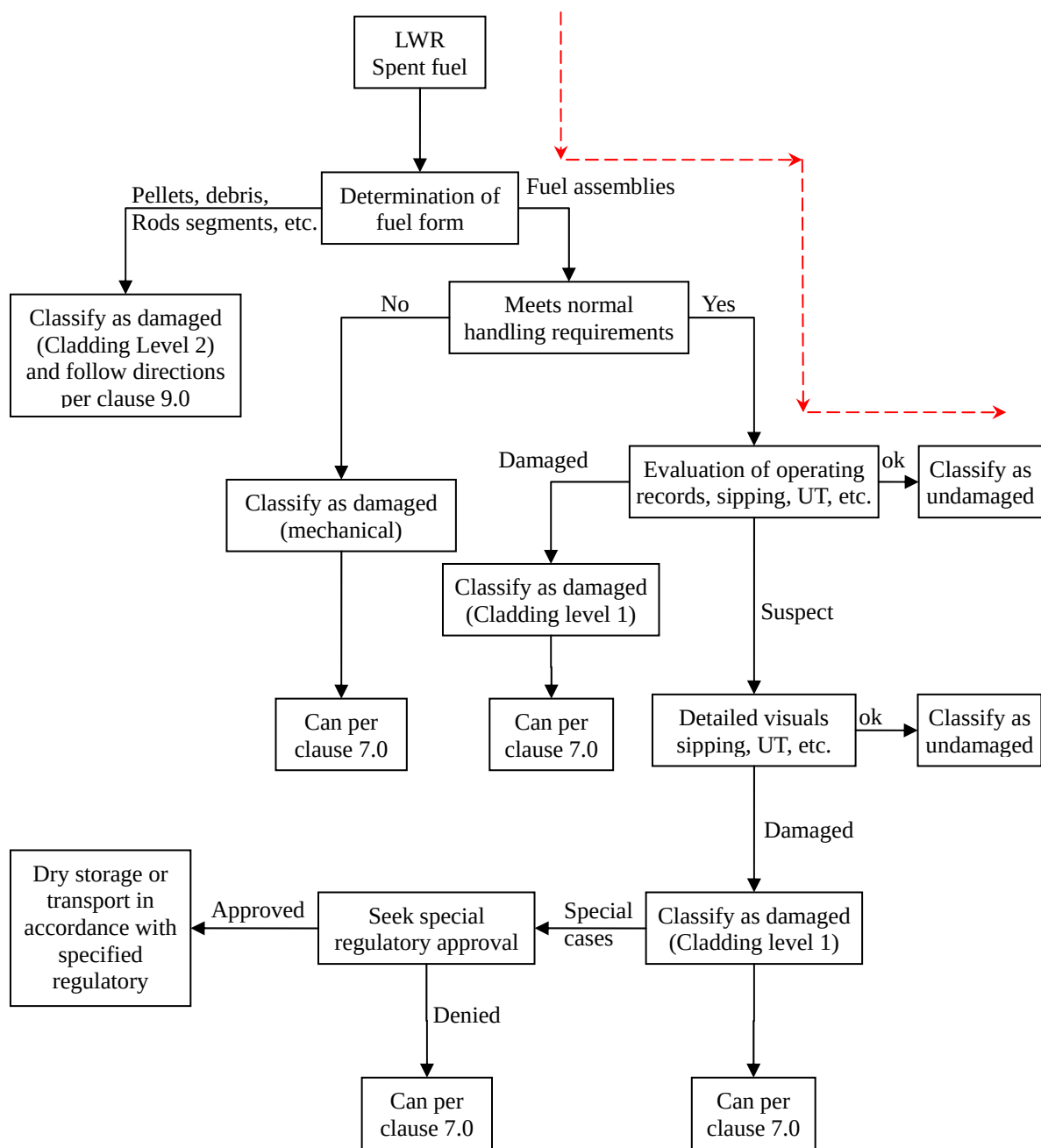


圖 1 ANSI N14.33 破損燃料分類流程圖

若依據運轉紀錄，顯示燃料有洩漏或其他破損，除非進行詳細分析顯示破損極輕細，否則就應判定為破損燃料。這類的分析需考量燃料護套小破損、似針孔護套洩漏及大裂口在爐心所造成的核種及活度差異，藉以判斷燃料破損的狀態。

4.1.2 燃料檢驗

若待運貯燃料缺乏完整的資訊，則應進行額外的燃料檢驗以驗證燃料完整性，及符合待驗燃料之破損特性。檢驗計畫應考量燃料設計、運轉功率及燃料貯存現況，包括燃料燃耗、冷卻時間、護套腐蝕狀況…等。檢驗方法可以啜吸試驗、超音波試驗⁽¹³⁾等方式，以評估燃料護套完整性。

4.2 燃料結構完整性

燃料結構完整性評估之依據包括可否正常吊卸、組件完整性(包括燃料束元件及維持燃料束完整外觀之相關組件)、機械及材料劣化特性、燃料整修紀錄等。

4.2.1 可否正常吊卸

燃料束“不能”以正常方式(Crane and Grapple)吊卸或移動者應歸類為破損燃料；組件經過修理可正常吊卸的燃料束，若無其他破損可被歸類為完整燃料。

4.2.2 組件完整性

燃料束之結構性組件，例如格架、格架片(Straps)或類似組件缺失或被取代，應被歸類為破損燃料，組件未缺失或損壞即為完整。

4.2.3 機械及材料劣化特性

燃料束及護套於正常貯存、運送時不致造成機械及材料性質劣化，除非評估意外事故（Design-Based Accident）狀況發生致承受能力有疑問

時，即完整性有問題時，歸類為破損燃料。

4.2.4 修理過之燃料束

若燃料棒或結構組件被移除，及燃料束修改對結構完整性產生負面影響，無法承受負重，不利貯存、運送，亦不能正常吊卸者，該燃料束應被歸類為破損燃料。

經修復完成之燃料束仍保持未破損組件及原始外觀雖可視為完整燃料，但在本計畫中，暫不予處理。

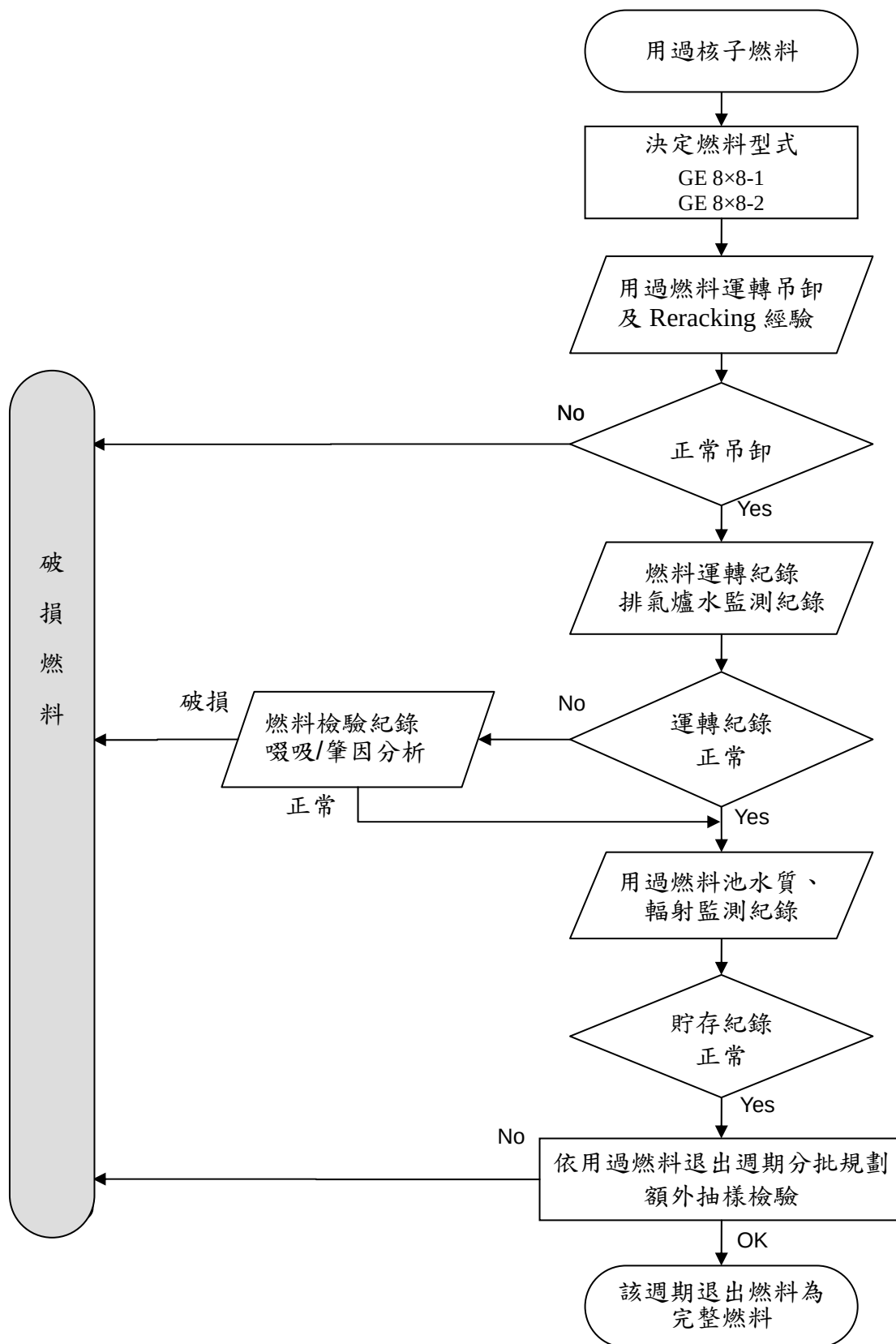


圖 2 核一廠乾式貯存燃料完整鑑識流程圖

5. 核子燃料完整性監測檢驗技術及分析

現有的核子燃料完整性監測檢驗技術包括燃料運轉例行監測及燃料池邊檢驗。例行監測的目的在於確認核子燃料護套的完整性，包括排廢氣監測、爐水活度監測及水質取樣檢測，對用過核子燃料池水質取樣監測、輻射監測等。此外對疑似破損燃料進行核子燃料池邊檢驗，例如：啜吸檢驗或超音波檢驗等，則可確認核子燃料束護套、結構與組件的完整性。

為確保用過核子燃料之完整，應確認燃料於（1）運轉期間及（2）貯存期間均為完整。燃料完整性監測檢驗分析方法於運轉期間主要依據爐心運轉排氣、爐水監測、啜吸或其他檢驗；於貯存期間主要依據燃料吊卸及燃料池格架重組（Reracking）之紀錄。

圖 2 為本計畫規劃核一廠第一階段用過核子燃料乾式貯存燃料完整性鑑識流程，主要為依據核一廠二部機組之燃料運轉實績、冷却水排廢氣監測數據、燃料吊卸與檢驗紀錄等資訊，排除破損燃料及疑似破損燃料，完成燃料完整性鑑識之完整燃料，將符合護套及結構性完整的需求，包括可正常吊卸、無破損歷史紀錄、啜吸檢驗無破損現象等。核一廠用過燃料完整性監測技術及分析方法依燃料護套及結構完整性需求，主要分為二個部份：

(1) 評估核子燃料護套完整性：

- a. 核子燃料運轉期間：排廢氣、爐水水質監測及檢驗紀錄。
- b. 對疑似破損燃料之啜吸檢驗及池邊檢驗結果。
- c. 用過燃料池水質監測紀錄。

(2) 評估核子燃料結構完整性：

- a. 燃料吊卸搬運紀錄。
- b. 對疑似破損燃料之目視檢查及池邊檢驗結果。

世界主要核能國家均累積相當豐富的燃料濕式貯存經驗。加拿大於1988年對貯存27年的燃料進行詳細檢驗，並未發現任何明顯變化⁽¹⁴⁾。法國使用再處理方式，燃料貯存時間較短，根據La Hague經驗，燃料經過貯存、運送、拆卸等程序後貯存於緊密提籃內，均無問題⁽¹⁴⁾。德國的經驗，氧化腐蝕不是問題，而電化學腐蝕經由材料選擇與池水化學控制可以被適當抑制，組件侵入性腐蝕也因為池水的低溫與材料的篩選而被抑制，故所有因為應力與應變造成的鋁合金破損機制發生可能性極低⁽¹⁴⁾。日本大多數燃料採濕式貯存，也未曾發現任何問題⁽¹⁴⁾。韓國實施長期燃料完整性監測計畫，亦未曾發現護套與組件腐蝕損壞⁽¹⁴⁾。西班牙與台灣狀況相似，自70年代開始貯存用過核子燃料，均經過一次以上燃料池格架重組的挪移，從未發現燃料於貯存期間破損⁽¹⁵⁾。美國不曾發生過貯存燃料棒破損，僅有一次PWR燃料束因腐蝕造成導套管(Guide Thimbles)連接處鬆脫，發生燃料束墜落事件⁽¹⁶⁾；由於核一廠屬沸水式反應器(BWR)，其燃料吊卸機構之設計不同於PWR燃料，係以繫棒(Tie Rod)做為組合結構，故不會有類似之情形發生。

輕水式核子燃料結構完整性，依據以往的經驗燃料在濕式貯存的行為表現一般均為優良，核子燃料護套在長期濕式貯存方式下，目前的經驗仍尚未發現任何可能造成負面影響的劣化機制，而無進一步劣化的可能。

燃料根據運轉週期及破損紀錄分析，確認燃料進出爐心的週期，配合爐水排氣監測數據及破損燃料啜吸檢測紀錄，可以評估燃料護套及結構完整性。

5.1 燃料運轉週期分析

本節敘述核一廠用過核子燃料在爐心內之運轉週期及燃料數量資訊，以提供燃料吊卸及檢驗計畫之依據。燃料因在爐心運轉週期數及位置不同，具有不同之燃耗，各週期燃料數量資訊如表 2、3 所示。

依據表 2 及表 3，核一廠用過核子燃料在爐心之運轉週期為二~四週期，其中部分初始燃料曾經在第一週期運轉，然後放置燃料池一週期後，再進入爐心運轉。待運貯燃料歷經多次吊運，均可正常吊卸，其燃料束組件結構完整性無虞，根據以往燃料池邊檢驗經驗，均未曾發現燃料束結構組件遺落。當發現爐水排廢氣活度異常時，燃料均曾經過啜吸檢驗，將破損燃料逐一篩選出來，此部份破損核子燃料將被排除在本次乾式貯存待貯存計畫之外。

表 2 核一廠一號機待運貯用過核子燃料退出週期、數量及破損資訊

退出週期	燃料數 (束)	爐心運轉週期	是否檢驗 ✓/×	破損燃料 (束/根)
2	256	第 2 週期共 1 束 第 1、2 週期共 255 束	✓	3/6
3	64	第 1、3 週期共 58 束 第 1、2、3 週期共 6 束	×	
4	112	第 1、2、3、4 週期共 3 束； 第 1、3、4 週期共 86 束； 第 2、3、4 週期共 23 束；	×	
5	128	第 3、4、5 週期共 8 束； 第 2、3、4、5 週期共 120 束；	✓	3/2
6	132	第 4、5、6 週期共 28 束； 第 3、4、5、6 週期共 104 束；	✓	1/1
7	120	第 5、6、7 週期共 84 束； 第 4、5、6、7 週期共 36 束；	✓	1/1
8	28	第 5、6、7、8 週期共 28 束	✓	4/6

表 3 核一廠二號機待運貯用過核子燃料退出週期、數量及破損資訊

退出週期	燃料數 (束)	爐心運轉週期	是否檢驗 ✓/×	破損燃料 (束/根)
1	1	第 1 週期共 1 束(破損燃料)	✓	1/1
2	191	第 1、2 週期共 191 束	×	
3	140	第 1、3 週期共 87 束 第 1、2、3 週期共 53 束	×	
4	128	第 1、2、4 週期共 36 束 第 1、3、4 週期共 40 束 第 2、3、4 週期共 52 束	✓	3/3
5	132	第 3、4、5 週期共 56 束 第 2、3、4、5 週期共 76 束	✓	3/3
6	116	第 4、5、6 週期共 72 束 第 3、4、5、6 週期共 44 束	✓	12/17
7	131	第 5、6、7 週期共 99 束 第 4、5、6、7 週期共 32 束	✓	破損燃料為 SPC 8×8-2 型
8	29	第 5、6、7、8 週期共 29 束	×	

5.2 核一廠燃料運轉紀錄分析－排氣監測及池邊檢驗紀錄分析

排氣監測紀錄分析提供之爐心監測資訊，可判斷運轉週期中排氣活度有無異常現象及燃料完整性。爐心運轉若無破損燃料時，排氣活度值將呈現較低的標準之下；若排氣活度發生異常突昇現象，顯示燃料可能發生破損；依「核一廠核燃料受損對策計劃」程序書規定，即須於該週期運轉期間或週期末大修期間執行核子燃料池邊檢驗，挑選出疑似破損燃料，不再填入爐心，以避免破損燃料於爐心長期運轉造成破損擴大，甚至因燃料溶出而導致背景劑量升高。一般而言，燃料經由池邊檢驗，挑選出破損燃料且不再填入爐心後，新爐心燃料之後續運轉，其排廢氣活度監測均可顯示明顯降低至無燃料破損標準以下。此一排廢氣或爐水活度降低現象，亦可確認破損燃料已被挑選出來。

根據「台灣電力公司核能機組核燃料績效歷史資料」⁽¹⁰⁾統計，核一廠一號機待運貯燃料運轉週期為第1至第8週期，第1週期初始燃料爐心無燃料破損紀錄，第2週期曾發生燃料破損且經啜吸檢驗，第3、4週期末發現排廢氣活度異常及燃料破損現象，第5~8週期之排廢氣總和及燃料可靠度指標(FRI)值均非常高或曾發生突昇現象，顯示有燃料破損，這幾個週期於週期末大修期間均曾做過燃料啜吸檢驗，新爐心燃料運轉後，排廢氣活度監測顯示皆較前一週期末降低。

二號機待運貯燃料運轉週期同為第1至第8週期，第1週期初始爐心即發生燃料破損，並於週期末執行啜吸檢驗，第2~3週期排廢氣活度無異常突昇現象，第4週期至第7週期的廢氣總和及FRI值皆非常高或曾發生突昇現象，顯示燃料發生破損，這幾個週期末均曾施以燃料啜吸

檢驗，於新的週期運轉後，排廢氣活度監測顯示皆已降低。第 8 週期排廢氣總和及可靠度指標監測值較前一週期降低，雖然活度趨勢偏高，但未超過燃料破損標準，該週期亦無燃料破損紀錄。

綜上所述，核一廠兩個機組待運貯燃料，皆歷經 8 個週期爐心運轉監測，其中各有 3 個週期爐心運轉監測皆無異常現象產生，5 個週期因週期中排廢氣異常突昇現象，曾於週期末大修期間進行啜吸檢驗，其中一號機為第 2、5、6、7 及 8 週期，二號機為第 1、4、5、6 及 7 週期進行燃料啜吸檢驗，除挑選出破損燃料外，其他經過數個週期爐心運轉監測之燃料，皆經過多次正常吊卸及啜吸檢驗，顯示無破損或異常現象產生，故可依據 ISG-1 Rev. 1 之燃料完整鑑識流程研判燃料護套及結構完整性。

6. 額外抽樣檢測計畫

參考 ISG-1 Rev. 1 之用過核子燃料完整性鑑識程序，藉由用過核子燃料運轉期間排廢氣、爐水活度監測及必要時執行的池邊檢驗紀錄分析，將可確認待運貯燃料之完整性。但由於核一廠係初次進行用過核子燃料乾式貯存作業，雖已藉由用過核子燃料之運轉歷史資訊及已執行之池邊檢驗歷史紀錄評估待運貯用過核子燃料之完整性，仍將另規劃額外之抽樣啜吸檢驗，以強化確認待運貯用過核子燃料完整性之信心。

檢驗或吊卸作業會增加核子燃料的受損機率，因此選用對燃料衝擊最小的啜吸檢驗方法來進行抽樣檢驗。抽樣檢驗的目的是在證明利用歷史紀錄判斷核子燃料完整性的鑑識程序是可靠的，但是當抽樣檢驗一旦找到破損，將就該批次全數檢驗；若沒有找到破損燃料，就據以證明整批燃料無損。

目前世界上 BWR 燃料檢驗都先以啜吸檢驗篩選破損燃料，其優點為不需要拆卸燃料匣，降低燃料額外損傷風險，且國內啜吸檢測之技術、人員及經驗遠較超音波檢驗成熟，同時核一廠目前已有啜吸檢驗設備，已執行多次試驗，操作狀況良好。國內近 20 年來，BWR 均未曾使用 UT 檢驗破損燃料。另外，核三廠二號機週期十四燃料破損事件，燃料廠家以 UT 未能找出破損燃料，而核能研究所以核三廠原有的真空啜吸設備，找出破損燃料棒。燃料破孔小於 0.2mm，當時燃料廠家認為破孔太小，燃料破損後水尚未能進入，因此 UT 檢測失敗；核三廠二號機週期十六燃料破損事件，由於 I-131 信號顯著，燃料廠家認為與週期十四燃料破損不同，卻仍未能利用 UT 設備找出破損燃料束，而後由核研所以真空啜吸設

備偵測出。顯示啜吸檢驗利用燃料護套內外壓力差改變，造成分裂性氣體洩漏，檢測其活度讀數之方法，可靠度非常高。

核一廠待運貯用過核子燃料額外抽樣檢驗計畫，係依據燃料退出週期、燃料績效歷史、機組排廢氣監測紀錄、真空啜吸檢驗等資訊，將待運貯燃料依據其退出週期分群組，進行抽樣檢驗，提供燃料完整性驗證之足夠的信賴度。擬定抽樣檢驗計畫時，適當評估抽樣檢驗群組的樣本數和抽樣數，以確認待運貯燃料符合完整性需求，且檢驗結果能具有相對高的信賴度。

6.1 抽樣計畫驗證

本計畫將選取核一廠乾式貯存用過核子燃料運轉紀錄最差之批次(二號機第 6 週期)進行 100%檢驗，若檢驗結果符合燃料完整鑑識流程評估結果，即驗證所選取的用過核子燃料為完整無破損，則依據 6.額外抽樣檢測計畫進行後續檢驗；惟若發現有受損之用過核子燃料，則將依受損數目決定後續增加抽樣檢查機制。

6.2 抽樣計畫

額外燃料抽樣檢驗計畫之抽樣數，係參考 EPRI-7218⁽¹⁷⁾提供之核能級商品檢證非破壞檢驗抽樣計畫之群組與抽樣數，表 4 是一個具有統計基礎的抽樣計畫，若抽樣樣本經檢驗後不符品質要求，則此群組疑似具有瑕疵樣本。

依據檢驗目標之特性，驗證時可採取不同的抽樣計畫，一般可分為

常態(Normal)、簡縮(Reduced)及加嚴(Tightened)三種不同的抽樣計畫。本計畫中待運貯用過核子燃料均已經過嚴謹之燃料完整性鑑識流程評估分析，確認燃料無破損之完好狀態，額外抽樣檢驗計畫為利用啜吸檢驗及抽樣統計理論，從評估為完整之用過核子燃料中隨機抽樣進行檢測，取得待運貯用過核子燃料額外資訊及達成統計品質管制之目的，驗證待運貯燃料完整性。由於燃料已經過嚴謹之燃料完整性鑑識流程評估分析，故額外抽樣檢驗計畫，擬採取簡縮抽樣計畫；每一個群組的合格基礎是假設抽樣樣本無破損，即抽樣檢驗不允許發現任何破損，則該群組允收；若抽樣樣本檢驗具有一個以上不合格抽樣數，則該群組將再施以同額增加抽樣樣本數再進行檢驗，若增加抽樣樣品均無破損，則該群組合格；若經同額增加抽樣樣本檢驗仍具有一個以上不合格抽樣數時，則該群組應執行全組檢驗(亦即 100%檢驗)，以確認該群組燃料之完整性。

依據燃料退出週期及數量資訊，將一號機待運貯用過核子燃料分為 7 個群組進行抽樣檢驗，其退出週期的燃料數量分別為第 2 週期退出之燃料共 256 束、第 3 週期退出之燃料共 64 束、第 4 週期退出之燃料共 112 束、第 5 週期退出之燃料 128 束、第 6 週期退出之燃料共 132 束、第 7 週期退出之燃料共 120 束、第 8 週期退出之燃料共 28 束；依據表 5 非破壞檢測抽樣計畫之批量抽樣數建議表之簡縮抽樣計畫，第 2 週期隨機抽樣 16 束、第 3 週期隨機抽樣 7 束、第 4 週期隨機抽樣 10 束、第 5 週期隨機抽樣 12 束、第 6 週期隨機抽樣 12 束、第 7 週期隨機抽樣 11 束，第 8 週期隨機抽樣 4 束進行啜吸試驗。

將二號機待運貯用過核子燃料退出週期及數量資訊分為 7 個群組，各退出週期群組的燃料數量分別為第 2 週期退出之燃料共 191 束、第 3 週期退出之燃料共 140 束、第 4 週期退出之燃料共 128 束、第 5 週期退

出之燃料共 132 束、第 6 週期退出之燃料共 116 束、第 7 週期退出之燃料共 131 束、第 8 週期退出之燃料共 29 束。二號機簡縮抽樣計畫中，第 2 週期隨機抽樣 15 束、第 3 週期隨機抽樣 13 束、第 4 週期隨機抽樣 12 束、第 5 週期隨機抽樣 12 束、第 7 週期隨機抽樣 12 束，第 8 週期隨機抽樣 4 束，第 6 週期因為週期中破損燃料數目最多，將進行進行 100% 燃料啜吸檢驗，以驗證抽樣計畫，如表 5 所列。

燃料抽樣原則考量破損肇因，包括：燃料丸護套作用(PCI)、端塞焊道腐蝕(ECC)及氫化(HYD)三項因素、燃料進入週期、退出週期、運轉週期數、及燃耗等條件，挑選待驗燃料。燃料丸護套作用破損與運轉有關，擬選取燃料丸護套作用受損燃料相對位置之用過核子燃料列入抽樣樣本中進行檢驗；焊道腐蝕及氫化與製造有關，擬選取焊道腐蝕及氫化破損的燃料編號流水號前後之燃料束，進行抽樣啜吸檢驗；同一週期進入之新燃料為同一批次製造生產，具有相同製造背景及燃料編號；燃料置於爐心中運轉，包括運轉功率、燃料溫度、分裂氣體釋出等因素，會造成燃料棒內壓變化，並經歷內部氫化、燃料丸受熱、燃料密實與腫脹、護套疲勞，以及氧化、氫化與污垢等，將對護套腐蝕及機械性質等產生差異性的影響，同一週期燃料具有相當大的不確定性及變異性；因此，在群組分類基本上，將不同的燃耗、退出週期及運轉週期數，視為具有不同的運轉歷史，可做為分類抽樣的依據。退出週期顯示燃料為同一週期退出爐心，最後退出週期具有相似的運轉環境；運轉週期數則顯示燃料在爐心中具有相似的運轉期程；燃耗則可提供燃料相對的照射數據、分裂氣體及功率資訊。依據上述抽樣條件，分析待運貯燃料的歷史背景和紀錄，以篩選待驗樣本。

表 4 非破壞檢測抽樣計畫之批量抽樣數建議表

Normal		Reduced		Tightened	
Lot size	Sample size	Lot size	Sample size	Lot size	Sample size
1	1	1~5	1	1	1
2~4	2	6~13	2	2	2
5~6	3	14~24	3	3~4	3
7~11	4	25~41	4	5~6	4
12~20	5	42~50	5	7~8	5
21~24	6	51~63	6	9~10	6
25~28	7	64~76	7	11	7
29~32	8	77~90	8	12~13	8
33~41	9	91~102	9	14~15	9
42~50	10	103~114	10	16~20	10
51~56	11	115~126	11	21~25	11
57~62	12	127~138	12	26~31	12
63~69	13	139~150	13	32~38	13
70~76	14	151~175	14	39~46	14
77~83	15	176~200	15	47~50	15
84~90	16	201~225	16	51~54	16
91~96	17	>225	16	55~58	17
97~102	18			59~62	18
103~108	19			63~66	19
109~114	20			67~70	20
115~120	21			71~74	21
121~126	22			75~78	22
127~132	23			79~82	23
133~138	24			83~86	24
139~144	25			87~90	25
145~150	26			91~94	26
151~162	27			95~98	27
163~174	28			99~102	28
175~186	29			103~106	29
187~198	30			107~110	30
199~210	31			111~114	31
211~225	32			115~118	32
>225	33			119~122	33
				123~126	34
				127~130	35
				131~135	36
				136~140	37
				141~145	38
				146~150	39
				151~158	40
				159~166	41
				167~174	42
				175~182	43
				183~190	44
				191~198	45
				199~207	46
				208~216	47
				217~225	48
				>225	49

燃料檢驗抽樣數量由表 5 決定，在各批量中，再依據進入週期、退出週期及運轉週期等條件，依待運貯燃料之歷史資料進行詳細分析及分群組，依專家經驗挑選破損肇因、最大燃耗之燃料做為抽樣樣本，使抽樣樣品具有代表不同破損肇因、製造批次、運轉週期、退出週期及最大燃耗之特性，以驗證不同運轉時期特性燃料完整性之可靠度。

表 5 燃料完整性抽樣檢驗各退出週期燃料數量及抽樣數

Item	EOC2	EOC3	EOC4	EOC5	EOC6	EOC7	EOC8	Total
CS1	16/256	7/64	10/112	12/128	12/132	11/120	4/28	72/840
CS2	15/191	13/140	12/128	12/132	116/116	12/131	4/29	79/867

1. CS1為核一廠一號機，CS2為核一廠二號機。
2. EOCN：EOC代表週期末，N代表週期數。
3. n/m：抽樣數目/批量樣本數。
4. CS2-EOC6該週期燃料全部檢驗以驗證抽樣計畫。

6.3 抽樣樣本

依據抽樣計畫所擬定核一廠兩部機組第一週期至第八週期燃料退出數量及抽樣數，以及前述抽樣原則，分析各週期退出燃料，篩選抽樣樣本如下：

一號機第 2 週期退出燃料 256 束，全部為第 1 週期進入、第 2 週期退出、運轉 2 週期之燃料，抽樣其中燃耗最高之 12 束燃料；ECC 及 HYD 破損肇因相關燃料 4 束；合計 16 束進行啜吸檢驗(表 6)。燃耗資料為核一廠所提供，為 GE 公司自行開發爐心計算程式(Panacea)計算所得之燃耗數據，單位為 MWD/STU。

表 6 一號機第 2 週期抽樣檢驗燃料(16/256)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	1	2	2	15315.63	LJ1341*
2	1	2	2	14198.38	LJ1343*
3	1	2	2	14102.63	LJ1360*
4	1	2	2	14979.63	LJ1362*
5	1	2	2	15954.25	LJ1477
6	1	2	2	15933.38	LJ1320
7	1	2	2	15930.00	LJ1169
8	1	2	2	15913.25	LJ1166
9	1	2	2	15898.88	LJ1303
10	1	2	2	15887.75	LJ1474
11	1	2	2	15885.38	LJ1323
12	1	2	2	15872.38	LJ1340
13	1	2	2	15669.00	LJ1243
14	1	2	2	15592.25	LJ1400
15	1	2	2	15481.50	LJ1260
16	1	2	2	15470.50	LJ1168

註：*為 ECC 或 HYD 破損肇因相關燃料。

一號機第 3 週期退出燃料 64 束，分為二個群組，第 1 週期進入、第 3 週期退出且運轉 3 週期之燃料 6 束，抽樣其中燃耗最高之 4 束燃料；第 1 週期進入、第 3 週期退出且運轉 2 週期之燃料 58 束，抽樣其中燃耗最高之 3 束燃料，合計共 7 束燃料進行啜吸檢驗(表 7)。

表 7 一號機第 3 週期抽樣檢驗燃料(7/64)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	1	3	3	17707.25	LJ1089
2	1	3	3	17709.00	LJ1123
3	1	3	3	17677.50	LJ1088
4	1	3	3	17644.50	LJ1122
5	1	3	2	17581.50	LJ1214

6	1	3	2	17577.00	LJ1227
7	1	3	2	17572.50	LJ1429

一號機第 4 週期退出燃料 112 束，分為三個群組：第 1 週期進入、第 4 週期退出且運轉 4 週期之燃料 3 束，抽樣其中燃耗最高之 1 束燃料；第 1 週期進入、第 4 週期退出且運轉 3 週期之燃料 86 束，抽樣其中燃耗最高之 4 束燃料；第 2 週期進入、第 4 週期退出且運轉 3 週期之燃料 23 束，抽樣其中燃耗最高之 4 束燃料；ECC 破損肇因相關燃料 1 束；合計共 10 束燃料進行啜吸檢驗(表 8)。

表 8 一號機第 4 週期抽樣檢驗燃料(10/112)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	2	4	3	21565.00	LJC849*
2	1	4	4	18584.00	LJ1139
3	2	4	3	22495.00	LJC862
4	2	4	3	22492.00	LJC910
5	2	4	3	22485.00	LJC802
6	2	4	3	22457.00	LJC901
7	1	4	3	20710.00	LJ1339
8	1	4	3	20697.00	LJ1304
9	1	4	3	20690.00	LJ1319
10	1	4	3	20676.00	LJ1324

註：*為 ECC 破損肇因相關燃料。

一號機第 5 週期退出燃料 128 束，分為二個群組：第 2 週期進入、第 5 週期退出且運轉 4 週期之燃料 120 束，抽樣其中燃耗最高之 8 束燃料；第 3 週期進入、第 5 週期退出且運轉 3 週期之燃料 8 束，抽樣其中燃耗最高之 1 束燃料；PCI 破損肇因相關燃料 2 束；ECC 破損肇因相關

燃料 1 束；合計共 12 束燃料進行啜吸檢驗(表 9)。

表 9 一號機第 5 週期抽樣檢驗燃料(12/128)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	2	5	4	28939	LJC891
2	2	5	4	28930	LJC796
3	2	5	4	28748	LJC827
4	2	5	4	28746	LJC878
5	2	5	4	26291	LJC882
6	2	5	4	26264	LJC852
7	2	5	4	26262	LJC847*
8	2	5	4	26171	LJC898
9	2	5	4	26170	LJC804
10	3	5	3	22375	LJL035
11	2	5	4	24995	LJC816**
12	2	5	4	24826	LJC880**

註：*為 ECC 破損肇因抽樣燃料；**為 PCI 破損肇因抽樣燃料。

一號機第 6 週期退出燃料 132 束，分為二個群組：第 3 週期進入、第 6 週期退出且運轉 4 週期之燃料 104 束，抽樣其中燃耗最高之 9 束燃料；第 4 週期進入、第 6 週期退出且運轉 3 週期之燃料 28 束，抽樣其中燃耗最高之 2 束燃料；PCI 破損肇因相關燃料 1 束；合計共 12 束燃料進行啜吸檢驗(表 10)。

表 10 一號機第 6 週期抽樣檢驗燃料(12/132)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	3	6	4	30400.72	LJL003
2	3	6	4	30206.03	LJL110
3	3	6	4	30200.75	LJL091
4	3	6	4	30197.32	LJL111

5	3	6	4	30195.51	LJL118
6	3	6	4	30175.25	LJL106
7	3	6	4	30174.19	LJL132
8	3	6	4	30163.50	LJL137**
9	3	6	4	30049.96	LJK993
10	3	6	4	30047.34	LJK997
11	4	6	3	25691.38	LJL465
12	4	6	3	25688.85	LJL463

註： **為 PCI 破損肇因抽樣燃料。

一號機第 7 週期退出燃料 120 束，分為二個群組：第 4 週期進入、第 7 週期退出且運轉 4 週期之燃料 36 束，抽樣其中燃耗最高之 3 束燃料；第 5 週期進入、第 7 週期退出且運轉 3 週期之燃料 84 束，抽樣其中燃耗最高之 5 束燃料；HYD 破損肇因相關燃料 2 束；PCI 破損肇因相關燃料 1 束；合計共 11 束燃料進行啜吸檢驗(表 11)。

表 11 一號機第 7 週期抽樣檢驗燃料(11/120)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	5	7	3	26476.42	LJL058*
2	5	7	3	24186.51	LJL060*
3	4	7	4	30933.09	LJL117
4	4	7	4	30932.35	LJL120
5	4	7	4	30917.60	LJL116
6	5	7	3	29008.07	LJL220
7	5	7	3	29005.55	LJL221
8	5	7	3	28992.57	LJL218
9	5	7	3	28990.83	LJL219
10	5	7	3	28452.39	LJL162
11	5	7	3	22897.89	LJL187**

註：*為 HYD 破損肇因抽樣燃料；**為 PCI 破損肇因抽樣燃料。

一號機第 8 週期退出燃料 28 束，全部為第 5 週期進入、第 8 週期退出且運轉 4 週期之燃料，抽樣其中燃耗最高之 4 束燃料進行啜吸檢驗(表 12)。

表 12 一號機第 8 週期抽樣檢驗燃料(4/28)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	5	8	4	29741.54	LJL170
2	5	8	4	29713.78	LJL173
3	5	8	4	29707.99	LJL069
4	5	8	4	29705.58	LJL164

二號機第 2 週期退出燃料 191 束，全部為第 1 週期進入、第 2 週期退出且運轉 2 週期之燃料，抽樣其中燃耗最高之 15 束燃料進行啜吸檢驗(表 13)。

表 13 二號機第 2 週期抽樣檢驗燃料(15/191)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	1	2	2	16882.25	LJ4678
2	1	2	2	16866.50	LJ4897
3	1	2	2	16803.50	LJ4679
4	1	2	2	16794.50	LJ4896
5	1	2	2	16785.00	LJ4939
6	1	2	2	16784.00	LJ4636
7	1	2	2	16711.00	LJ4662
8	1	2	2	16705.50	LJ4913
9	1	2	2	16702.50	LJ4714
10	1	2	2	16696.75	LJ4698
11	1	2	2	16685.50	LJ4861
12	1	2	2	16674.00	LJ4877
13	1	2	2	16670.75	LJ4631

14	1	2	2	16643.00	LJ4944
15	1	2	2	16642.50	LJ4914

二號機第 3 週期退出燃料 140 束，分為二個群組：第 1 週期進入、第 3 週期退出且運轉 2 週期之燃料 87 束，抽樣其中燃耗最高之 5 束燃料；第 1 週期進入、第 3 週期退出且運轉 3 週期之燃料 53 束，抽樣其中燃耗最高之 6 束燃料；ECC 破損肇因相關燃料 2 束；合計共 13 束燃料進行啜吸檢驗(表 14)。

表 14 二號機第 3 週期抽樣檢驗燃料(13/140)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	1	3	2	15538.75	LJ4891*
2	1	3	2	15080.63	LJ4893*
3	1	3	2	16245.13	LJ4926
4	1	3	2	16234.38	LJ4649
5	1	3	2	16228.75	LJ4931
6	1	3	2	16224.63	LJ4644
7	1	3	2	16213.75	LJ4844
8	1	3	3	16172.63	LJ4831
9	1	3	3	18962.75	LJ4802
10	1	3	3	18960.50	LJ4773
11	1	3	3	18667.50	LJ4565
12	1	3	3	18654.00	LJ4599
13	1	3	3	18582.75	LJ4782

註：*為 ECC 破損肇因相關燃料。

二號機第 4 週期退出燃料 128 束，分為三個群組：第 2 週期進入、第 4 週期退出且運轉 3 週期之燃料 52 束，抽樣其中燃耗最高之 4 束燃料；第 1 週期進入、經第 3 週期運轉、第 4 週期退出且運轉 3 週期之燃料 40

束，抽樣其中燃耗最高之 3 束燃料；第 1 週期進入、經第 2 週期運轉、第 4 週期退出且運轉 3 週期之燃料 36 束，抽樣其中燃耗最高之 3 束燃料；HYD 破損肇因相關燃料 2 束；合計共 12 束燃料進行啜吸檢驗(表 15)。

表 15 二號機第 4 週期抽樣檢驗燃料(12/128)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	2	4	3	25374	LJL287*
2	2	4	3	26674	LJL362*
3	2	4	3	26816	LJL275
4	2	4	3	26794	LJL257
5	2	4	3	26792	LJL345
6	2	4	3	26774	LJL245
7	1	4	3	19890	LJ4911
8	1	4	3	19806	LJ4915
9	1	4	3	19781	LJ4660
10	1	4	3	15424	LJ4865
11	1	4	3	15387	LJ4850
12	1	4	3	15385	LJ4710

註：*為 HYD 破損肇因相關燃料。

二號機第 5 週期退出燃料 132 束，分為二個群組：第 2 週期進入、第 5 週期退出且運轉 4 週期之燃料 76 束，抽樣其中燃耗最高之 4 束燃料；第 3 週期進入、第 5 週期退出且運轉 3 週期之燃料 56 束，抽樣其中燃耗最高之 2 束燃料；HYD 破損肇因相關燃料 4 束；PCI 破損肇因相關燃料 2 束；合計共 12 束燃料進行啜吸檢驗(表 16)。

表 16 二號機第 5 週期抽樣檢驗燃料(12/132)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	2	5	4	30906	LJL306

2	2	5	4	30893	LJL247
3	2	5	4	30850	LJL312
4	2	5	4	30849	LJL352
5	2	5	4	28700	LJL269*
6	2	5	4	26918	LJL270*
7	2	5	4	28322	LJL285*
8	2	5	4	27184	LJL360*
9	3	5	3	28232	LJL413
10	3	5	3	28227	LJL411
11	2	5	4	29153	LJL355** (爐心 Y 軸)
12	2	5	4	29137	LJL279** (爐心 Y 軸)

註：*為 HYD 破損肇因抽樣燃料；**為 PCI 破損肇因抽樣燃料。

二號機第 6 週期退出燃料 116 束，原挑選 11 束燃料進行啜吸檢驗(表 17)。由於本週期破損燃料 11 束，為核一廠乾式貯存待運貯用過核子燃料運轉紀錄最差之週期，將進行 100%檢驗，以驗證本計畫用過核子燃料之完整性。

表 17 二號機第 6 週期原規劃抽樣檢驗燃料(11/116)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	破損燃料	燃耗 MWD/STU	抽樣 燃料編號	備註
1	3	6	4	LJL371	28668.06	LJL373**	爐心對稱
2	5	7	3	LJL414	26623.84	LY1974**	控制棒 X 軸對稱
3	4	6	3	LJL415	23094.39	LJL540**	控制棒 Y 軸對稱
4	4	6	3	LJL416	24630.39	LJL475**	控制棒對稱
5	5	7	3	LJL417	26618.22	LY2028**	控制棒 X 軸對稱
6	4	6	3	LJL526	23106.14	LJL543**	爐心 Y 軸
				LJL549			無對稱位置燃料可選取
				LY1880			無對稱位置燃料可選取
				LY1888			無對稱位置燃料可選取
7	5	7	3	LY1891	26619.71	LY1992**	控制棒 Y 軸對稱
8	4	6	3	LY1893	25711.52	LJL467**	爐心對稱
9	3	6	4	—	25270.11	LJL476**	第 5 週期破損燃料 LJL498 爐心對稱

10	3	6	4	—	30035.07	LJL503	燃耗最高
11	3	6	4	—	30033.59	LJL491	燃耗最高

註： **為 PCI 破損肇因抽樣燃料。

二號機第 7 週期退出燃料 131 束，分為二個群組：第 4 週期進入、第 7 週期退出且運轉 4 週期之燃料 32 束，抽樣其中燃耗最高之 4 束燃料；第 5 週期進入、第 7 週期退出且運轉 3 週期之燃料 99 束，抽樣其中燃耗最高之 7 束燃料；PCI 破損肇因相關燃料 1 束，LY1974 係與第 6 破週期破損燃料控制棒 Y 軸對稱位置，於第 6 週期退出；合計共 12 束燃進行啜吸檢驗(表 18)。

表 18 二號機第 7 週期抽樣檢驗燃料(12/131)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	5	7	3	30075.69	LY1923
2	5	7	3	30073.06	LY1943
3	5	7	3	30071.56	LY1933
4	5	7	3	30069.4	LY1953
5	5	7	3	29868.38	LY1965
6	5	7	3	29865.91	LY2001
7	5	7	3	29859.55	LY1983
8	4	7	4	30503.95	LJL487
9	4	7	4	30501.84	LJL183
10	5	7	3	26618.22	LY2028** (控制棒 X 軸)
11	5	7	3	26619.71	LY1992** (控制棒 Y 軸)
12	5	7	3	26623.84	LY1974** (控制棒 Y 軸)

註： **為 PCI 破損肇因抽樣燃料。

二號機第 8 週期退出燃料 29 束，全部為第 5 週期進入、第 8 週期退出且運轉 4 週期之燃料，抽樣其中燃耗最高之 4 束燃料進行啜吸檢驗(表

19)。

表 19 二號機第 8 週期抽樣檢驗燃料(4/29)

項目	進入週期	退出週期	運轉週期數	燃耗 MWD/STU	燃料編號
1	5	8	4	28637.14	LJL531
2	5	8	4	28636.32	LJL237
3	5	8	4	28635.01	LJL557
4	5	8	4	28633.07	LJL561

6.4 檢驗時程

配合用過核子燃料運貯規劃與核一廠大修時程規劃，用過核子燃料完整性額外抽樣檢驗時程（如表 20）預訂於 98 年 12 月開始至 99 年 3 月底止。首先檢驗二號機第 6 週期退出之用過核子燃料，檢驗結果若發現有受損之用過核子燃料，則將依檢驗結果之受損數目陳報以決定後續增加抽樣檢查機制；若無任何用過核子燃料發生破損，則依額外抽樣檢驗計畫繼續執行 2 號機其他週期之燃料抽樣啜吸檢驗，2 號機檢驗完畢之後，則將相關啜吸檢驗設備移至 1 號機繼續執行抽樣啜吸檢驗。以上檢驗時程規劃之實際作業時程與檢驗範圍，可依計畫實際協商結果配合調整。

表 20 用過核子燃料完整性額外抽樣檢驗時程

順序	機組	燃料檢驗排定時程	退出週期
1	2 號機	98.12.1	6
2	2 號機	至	2、3、4、5、7、8
3	1 號機	99.3.31	2、3、4、5、6、7、8

7. 品質保證

為確保能達成本檢驗作業執行時之品質要求，將依下列二項品保文件執行及監督相關檢驗作業：

- (1) 「台電公司核能營運品質保證方案」：用以確保核能發電相關設施之安全運轉，適用於營運中核能發電有關設施及各核能營運單位之核能安全相關作業。
- (2) 「核一廠用過核燃料乾式貯存設施採購帶安裝」品保手冊：據以實施本計畫之品保計畫，手冊中說明各作業實施辦法，並增列相關對應的作業程序書，說明各作業的實施細則。

7.1 人員資格

燃料檢驗作業人員應由具備電廠啜吸或相關檢驗經驗者任之；負責判讀檢測結果之人員，必須具備一年以上執行真空啜吸檢驗之經驗。

7.2 人員訓練

參與燃料檢驗作業之人員，必須接受至少共 4 小時之課堂及操作訓練，內容包括 BWR 燃料操作、燃料真空啜吸系統操作與受損燃料判斷、電廠工安與輻射安全訓練等，並將訓練課程資料、參加人員及訓練結果做成記錄備查。

8. 結語

核一廠乾式貯存待運貯用過核子燃料完整性評估與檢驗規劃參考 ISG-1 Rev. 1 規範，進行待運貯燃料之完整性評估，規劃貯存 25 個混凝土護箱，至少 1366 束燃料。

待運貯用過核子燃料將排除不能以正常方式吊運處理者，並評估爐心運轉資料，及從燃料檢測紀錄評估是否符合規範需求，以確認待運貯燃料的完整性。

為提昇對燃料完整性之信心，並將參考 EPRI-7218 之樣本抽樣計畫，規劃待運貯燃料額外抽樣檢驗，以燃料退出爐心週期分群組，抽樣進行啜吸檢驗，以加強燃料完整性之信心。

待運貯燃料除執行上述運轉歷史資訊評估分析、抽樣檢驗，各燃料束之歷史資料、檢視結果、檢驗結果將建立完整資料庫，並完成評估報告，以備未來查驗。

參考文獻

1. “核一廠用過核子燃料乾式貯存設施技術移轉案招標規範”，ISFSI-01-PRM-05004-01, 核能研究所，Sep. 2005。
2. 放射性物料管理法，中華民國九十一年十二月二十五日公布。
3. 放射性物料管理法施行細則，中華民國92年7月30日實施。
4. 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. 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. NRC Regulation (10 CFR) PART 72—Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High-level Radioactive Waste, and Reactor-related Greater than Class C Waste.
7. Spent Fuel Project Office Interim Staff Guidance – 1 Revision 1 “Damage Fuel”, NRC, Dec. 2002.
8. NUREG – 1536, Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems, NRC, January 1997.
9. NUREG – 1567, Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities, NRC, March 2000.
10. “台灣電力公司核能機組核燃料績效歷史資料”，核能發電處，94年1月。
11. “Characterizing Damaged Spent Nuclear Fuel for the Purpose of Storage and Transport”, ANSI-N14.33, 2005.
12. “Fuel Classification Protocol for Dry Fuel Storage ”, Feb. 17, 2000.

13. “Technique of Monitoring Cladding Integrity of RBMK-1000 Spent Fuel Assemblies after Long Term Storage”, IAEA-CN-102/72p, Proc. IAEA Intl. Conf. Storage of Spent Fuel from Power Reactor, 2-6 June 2003, Vienna.
14. “Spent Fuel Performance Assessment and Research”, IAEA-TECDOC-1343.
15. “Long Term Storage of Spent Nuclear Fuel—Survey and Recommendations”, IAEA-TECDOC-1293.
16. “Potential for Top Nozzle Separation and Dropping of A Certain Westinghouse Fuel Assembly”, NRC-IN-2002-09.
17. “Guideline for the Utilization of Sampling Plans for Commercial-Grade Item Acceptance (NCIG18)”, EPRI-NP-7218, June 1996.

附錄一 ISG-1

Spent Fuel Project Office
Interim Staff Guidance - 1
Revision 1
Damaged Fuel

Issue:

This ISG provides definitions of damaged fuel, outlines how damaged fuel is considered in storage or transportation analyses, and provides guidance for classifying spent fuel as either damaged or intact prior to placing the fuel into storage or transportation casks.

It is necessary to define damaged fuel and specify special conditions for its handling, storage, and transportation in order to accomplish several requirements:

- (1) Confine gross fuel particles that may escape from damaged cladding.
- (2) Facilitate retrieval from a storage or transportation cask.
- (3) Confine damaged fuel assemblies within a known volume to facilitate criticality control, maintain dose limits, and control thermal loads within the cask.

This revision of ISG-1 incorporates the following changes:

- (1) Expands the definition of damaged spent fuel beyond the confinement-based definition of cladding defects greater than hairline cracks or pinholes. The expanded definition addresses other degradation modes, and, most significantly, requires evaluation of spent fuel that may contain material or mechanical conditions which could lead to fuel failure under some conditions such as the stresses inherent to the hypothetical accident conditions of transportation.
- (2) Defines a damaged-fuel-can.
- (3) Provides guidance for a licensee to demonstrate the condition of spent fuel as damaged or intact.
- (4) Allows for an alternative to placing some forms of damaged fuel into a damaged-fuel-can if it can be shown through analysis that the assembly in question is capable of withstanding all design loads without reconfiguring.
- (5) Clarifies when criticality analyses are required of damaged fuel assemblies.

This revision to ISG-1 is necessary due to the expanded definition of damaged fuel that has evolved over the course of storage and transportation cask license reviews. The staff recognized that the existing cladding-defect-based definition of damaged fuel failed to capture other degraded fuel conditions such as missing grid spacers. More significantly, it failed to address fuel assembly structural performance under certain design conditions, especially during the hypothetical accident conditions of transportation.

Structural performance of the cladding and the entire assembly is related to the design conditions. This revised guidance recognizes that the Part 72 normal and design basis events place entirely different stresses upon the spent fuel than those in the Part 71 normal and hypothetical accident conditions. These differing design conditions require a damaged fuel definition that is based upon whether the fuel is being prepared for storage or transportation. This differentiation recognizes the licensees' varying needs by allowing fuel classification as damaged or intact for storage-only, with later analysis against Part 71 requirements when the need arises.

In addition to these design condition differences, the staff recognizes that some high burn-up fuel that could be classified as intact under storage-only conditions may not have sufficient cladding or structural integrity to withstand the more severe stresses of a transportation hypothetical accident. Consequently, some "intact" high burn-up fuel placed in storage casks may need to be evaluated in the future against the more severe stresses inherent to the hypothetical accident conditions of transportation when such fuel is to be transported.

Regulatory Basis:

The spent fuel transportation and storage regulations (10 CFR Parts 71 and 72) have the following common safety objectives:

- (1) Ensure that doses are less than the limits prescribed.
- (2) Maintain subcriticality under specified conditions of storage and transportation.
- (3) Ensure there is adequate confinement of the spent fuel during storage and transportation.

Additionally, Part 72 regulations and operational considerations under Part 71 require that the spent fuel be readily retrievable after specified conditions of storage or transportation.

For storage, 10 CFR 72.124 and 72.236(c) require that the configuration of the spent fuel geometry be maintained when feasible to assure subcriticality under all credible normal and design basis events of storage. Parts 72.122 (h)(1), 72.122(l) and 72.236(m) seek to ensure safe fuel storage and handling and to minimize post-operational safety problems with respect to retrievability of the fuel from the storage system.

During normal conditions of transportation, the geometric form of the spent fuel should not become substantially altered. Also, for normal conditions, the licensee must assure that there will be no loss or dispersal of spent fuel, no significant increase in external surface radiation

levels, and no substantial reduction in the effectiveness of the spent fuel package as required by 10 CFR 71.43(f).

Under the hypothetical accident conditions of transportation, the licensee must assure that design loads imposed upon the fuel assemblies do not lead to a failure that would invalidate design assumptions used to satisfy the criticality control requirements of 10 CFR 71.55 and the shielding and containment requirements of 10 CFR 71.51.

Applicability

This guidance applies to reviews of dry cask storage systems and transportation casks conducted in accordance with NUREG-1536, "Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems" (January 1997), NUREG-1567, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities" (March 2000), or NUREG-1617, "Standard Review Plan for Transportation Packages for Spent Nuclear Fuel" (March 2000).

This revision supercedes ISG-1, Revision 0, in its entirety.

Definitions

Damaged fuel - Spent nuclear fuel is considered damaged for storage or transportation purposes if it manifests any of the following conditions that result in either compromise of cladding confinement integrity or rearrangement (reconfiguration) of fuel bundle geometry:

- 1) The fuel contains known or suspected cladding defects greater than a pinhole leak or hairline crack that have the potential for release of significant amounts of fuel particles into the cask.
- 2) The fuel assembly:
 - a) Is damaged in such a manner as to impair its structural integrity;
 - b) Has missing or displaced structural components such as grid spacers;
 - c) Is missing fuel pins which have not been replaced by dummy rods which displace a volume equal to or greater than the original fuel rod;
 - d) Cannot be handled using normal (i.e., crane and grapple) handling methods. (Exception: fuel assemblies with repaired lifting bails, support caps, or support tubes, etc., which permit normal handling may be classified as intact. See later discussion.)
- 3) The fuel is no longer in the form of an intact fuel bundle and consists of, or contains, debris such as loose fuel pellets, rod segments, etc.
- 4) The fuel assembly structural hardware or cladding material properties are in a degraded condition such that its ability to withstand the normal and design basis events of storage (for storage-only casks), or the normal and hypothetical accident conditions of transport as intact

fuel is questionable. This condition could apply to some high burn-up assemblies. The NRC is sponsoring research to verify the material properties of high burn-up assemblies.

Note: Due to the very different design conditions of storage versus transportation, a (primarily high burn-up) fuel assembly classified as intact under storage-only conditions may require reanalysis against the more severe conditions of transportation prior to being transported. Fuel classified as damaged under storage-only conditions would remain classified as damaged under transportation conditions.

5) The fuel exhibits any other condition that is judged to be adverse to the criteria of confining radioactive material, controlling criticality, maintaining shielding, dose, or thermal limits or is adverse to the design conditions of the cask.

Damaged-Fuel-Can - A metal enclosure sized to contain one fuel assembly. Damaged fuel is placed inside a damaged-fuel-can ("canned") prior to loading it into a dry storage or transportation cask. The can must be individually removable from the cask using normal fuel handling methods (crane and grapple). The can may use a mesh screen to achieve gross particulate confinement but allow water drainage during wet loading operations. The purpose of a damaged-fuel-can is to confine gross fuel particles, debris, or damaged assemblies to a known volume within the cask to facilitate criticality, shielding, and thermal requirements and permit normal handling and retrieval from the cask. The damaged-fuel-can may need to contain neutron absorbing materials to prevent criticality if many damaged assemblies are co-located in a single cask.

Discussion

Spent fuel is classified as either damaged or intact in accordance with the preceding definitions and the guidance following. Use of the guidance for classification of damaged or intact fuel will reasonably assure that the fuel is properly identified and handled to meet the safety and regulatory requirements governing Parts 72 and 71. Normally, when fuel is classified as damaged, it must be placed into a damaged-fuel-can prior to being loaded into a storage or transportation cask unless additional analyses can show that no reconfiguration of the fuel assembly or no gross failure of the cladding will occur. If such analyses demonstrate that the otherwise "damaged" fuel assembly will maintain cladding integrity and normal configuration under the design loads, then the requirement for placing that assembly into a damaged fuel can may be omitted. See later discussion under "Alternative Method for Classifying Fuel (Performance Based)".

Storage Accident Analyses

When storage accident conditions/analyses are referred to in this document, the following special conditions apply:

1) The structural evaluation of the spent fuel shall consist of a fuel assembly buckling analysis for credible end-drop accidents and bending analyses for credible tip-over or side-drop accidents. Consideration of defects such as loss of cladding thickness due to oxidation should be included in the analyses. Fuel assemblies that do not fail under these loads are considered structurally intact.

2) Criticality analyses for both intact and canned damaged fuel should be in accordance with the requirements of 10 CFR 72.124.

Criticality, Dose Limits, and Thermal Control of Damaged Fuel

The potential reconfiguration of damaged fuel within the damaged-fuel-can must be analyzed to demonstrate that the cask/fuel meet the criticality, dose, and thermal limits of normal and design basis events of storage and/or normal and hypothetical

accident conditions of transportation. Bounding analyses may be performed. A criticality analysis for canned damaged fuel is typically performed by assuming a non-mechanistic redistribution of the fuel pellets into the most reactive geometry and assessing against the staff accepted K-effective limit of 0.95. Shielding and thermal analyses should similarly assume a worst case or bounding configuration (not necessarily the same for each analysis) of the canned fuel.

Methods for Classifying Fuel

The following steps describe the considerations and criteria that may be used to classify fuel as

either intact or damaged. Since this guidance does not attempt to envision all possible circumstances, the licensee has the responsibility to develop a logically supported inspection

plan appropriate for the fuel in question.

Along with the demonstration of cladding integrity, the structural integrity of a fuel assembly

must also be demonstrated. Structural integrity assessments include consideration of assembly

hardware items such as grid straps, grid spacers, and related components that maintain the

geometric form of the assembly. Existing in-core and handling records may be used for the

classification, or additional examinations may be performed to classify the fuel.

A fuel assembly must meet the criteria for both intact cladding and structural integrity to be

classified as intact.

1.0 Consideration of Cladding Condition

1.1 Classification Based Upon Existing Records

1.1.1 If the fuel has no indication of operating leakage based upon core history records,

handling records, and no unusual conditions are evident, then the fuel may be classified

as intact (undamaged). “Unusual conditions” means licensees should consider, for high

burn-up fuels, irradiation embrittlement or other structural integrity-altering degradation

(hydride lenses, excessive oxidation, oxide spalls) that could affect the ability of the fuel

to remain intact under design basis conditions for storage and/or transport.

1.1.2 If operating records, such as core history, indicate leakage or other damage, then the

fuel must be considered damaged unless additional analysis of the information demonstrates the nature of the damage is small. Such analyses could consider the incore

radionuclide differences between small, pinhole-like cladding leaks and larger cladding breaches.

1.1.3 Fuel in the form of debris (rod segments, pellets, etc.) or an assembly containing debris

is classified as damaged fuel.

1.2 Classification Based Upon Additional Examination

1.2.1 Fuel lacking adequate records should be further examined to demonstrate its condition.

Testing methods such as sipping, UT, etc., may be used to evaluate the fuel for cladding damage. The testing method that is selected must be appropriate for the fuel

being examined and the type of damage to be detected. When developing an inspection plan, the fuel design, history, and condition should be considered. Items of consideration should include but are not limited to: burn-up, decay time, and cladding condition (oxide spalls, hydride lenses, etc.). If the examination results indicate that the fuel has cladding damage greater than pinhole leaks or hairline cracks, it is classified as damaged.

2.0 Classification of Fuel Structural Integrity

2.1 A fuel assembly NOT capable of being handled and moved by normal means (i.e. crane and grapple) must be classified as damaged. Assemblies with modified or repaired top bails, etc., may be classified as intact provided no other damage is present.

Note: an assembly capable of being handled by normal means is insufficient justification by itself for being classified as intact.

2.2 Fuel assemblies with missing or displaced structural elements such as grid spacers, grid straps or similar hardware must be classified as damaged.

2.3 Degraded mechanical/material properties (structural components or cladding).

2.3.1 If the fuel assembly or cladding is in such condition that its ability to withstand the

normal and design basis events of storage or the normal and hypothetical accident

conditions of transport, intact, is questionable, it shall be classified as damaged.

Intact

means no geometric rearrangement of the fuel assembly or no gross failure of the

cladding. Licensees should consider the effects of irradiation embrittlement and other

structural integrity-altering degradation (hydride lenses, oxide spalls) that could affect

the ability of the fuel to remain intact.

2.4 Fuel Assemblies That Have Undergone Modifications

2.4.1 A fuel assembly shall be classified as damaged if fuel rods or structural components

have been removed, the assembly has been altered such that its structural integrity is

adversely affected under the design basis storage and/or transportation conditions, or

normal handling can not be accomplished.

2.4.2 A fuel assembly with missing fuel pins shall be classified as damaged unless criticality

analyses demonstrate an acceptable value of K-effective with the fuel pins missing.

Structural analyses should demonstrate the assembly remains intact under design basis

storage and/or transportation conditions.

2.4.3 Fuel assemblies that are reconstituted and complete, contain undamaged components

of original type or equivalent, and are of original geometry, are considered intact.

Repairs to Assembly Lifting Hardware

Fuel assemblies that have experienced damage to the lifting bail or assembly end cap are considered damaged unless modified to permit normal handling. Modifications to the lifting bail or modifications to the assembly end cap to permit handling by normal means may permit its classification as intact fuel (assuming no other types of damage are present). However, before so classifying any such assembly, the licensee must evaluate the repair method. The evaluation must reasonably demonstrate that the repair will not degrade as a result of exposure to the high temperatures of dry storage or transportation (relative to spent fuel pool temperatures) or other design conditions such as the hypothetical drop accident of transportation.

Fuel bundles so classified as intact should be documented and the documentation included as part of the documentation for that specific assembly. The documentation should include a description of the repair design features and a record of where such bundles are located within a cask.

Any special tooling required for lifting such bundles should accompany the cask and be provided to any organizations responsible for future fuel handling activities.

Note that compliance with these provisions for repaired lifting hardware does not imply that the Department of Energy will accept this fuel as “standard fuel” at a permanent disposal repository.

Alternative Method for Classifying Fuel (Performance Based)

A fuel assembly otherwise classified as damaged by this guidance may be analyzed against storage or transportation conditions to determine if it may be treated as intact fuel. This approach could allow the licensee to avoid the requirement for using damaged fuel cans in some cases. Specific evaluation methods are not delineated herein but they should encompass a structural integrity or flaw tolerance analysis to determine fuel assembly performance under the appropriate storage or transportation conditions. Such analyses must demonstrate with reasonable assurance that the damaged assembly can withstand those conditions without loss of cladding confinement capability or becoming reconfigured. Since there is no staff-approved methodology for performing such evaluations, they must be reviewed and approved on a case-by-case basis by the NRC staff. When an evaluation is used to justify not canning the damaged fuel, then it shall be documented and retained as part of the record for each fuel assembly.

Records

Records documenting the classification of fuel shall comply with the provisions of 10 CFR 72.174, “Quality Assurance Records” and 10 CFR 72.72, “Material Balance, Inventory, and Records Requirements for Stored Material.”

Quality Assurance

Activities related to inspection, evaluation, and documentation of damaged fuel for dry storage shall be performed in accordance with an NRC-approved quality assurance program as required in 10 CFR Part 72, Subpart G, "Quality Assurance."

Recommendation

The staff recommends that: (1) the definitions in NUREG-1536, NUREG-1567, and NUREG-1617 be revised to incorporate the definitions listed above, (2) the appropriate chapters of each NUREG be revised to include the discussion section of this ISG, and (3) an appendix to each NUREG be added to include requirements for classifying damaged spent fuel.

Approved	<u> /RA/ </u>	<u> 10/25/02 </u>
	E. William Brach	Date