

第六章 設施之安全評估報告及預期之意外事故評估

第六章第一節 臨界安全評估

目錄

一、臨界安全評估	6.1.1-1
(一) 前言	6.1.1-1
(二) 設計準則	6.1.2-1
(三) 分析模式	6.1.3-1
1. 計算機程式	6.1.3-1
2. 基本假設	6.1.3-2
3. 計算機程式模式	6.1.3-3
4. 分析項目	6.1.3-5
5. 材料密度與組成	6.1.3-6
(四) 實驗驗證評估	6.1.4-1
1. 護箱次臨界安全基準簡介	6.1.4-1
2. 標準臨界實驗說明	6.1.4-2
3. 驗證計算結果	6.1.4-3
(五) 分析結果	6.1.5-1
1. 決定設計基準燃料	6.1.5-1
2. 護套間隙注滿水對反應度的影響	6.1.5-2
3. 燃料匣厚度變化對反應度的影響	6.1.5-2
4. 燃料束各組件幾何尺寸製造公差對反應度的影響	6.1.5-3
5. 燃料束均勻化與非均勻化濃縮度分佈對反應度的影響	6.1.5-3
6. 密封鋼筒內部與外部水密度變化對反應度的影響	6.1.5-3
7. 提籃結構幾何尺寸製造公差與燃料束機械性偏移對反應度的 影響	6.1.5-4
8. 傳送護箱最大反應度與可容許最高濃縮度	6.1.5-5
9. 護箱在正常狀況、異常事件與意外事故的臨界分析	6.1.5-5
10. 合併燃料束幾何尺寸公差對反應度的影響	6.1.5-6
(六) 結語	6.1.6-1
(七) 參考文獻	6.1.7-1

附圖目錄

圖 6.1.3-1 密封鋼筒縱切面	6.1.3-7
圖 6.1.3-2 提籃結構橫切面	6.1.3-8
圖 6.1.3-3 可移除或替換之中子吸收板位置	6.1.3-9
圖 6.1.3-4 彎角支撐鉚件與側邊支撐鉚件	6.1.3-10
圖 6.1.3-5 傳送護箱縱切面	6.1.3-11
圖 6.1.3-6 混凝土護箱縱切面	6.1.3-12
圖 6.1.4 1 驗證計算所得 k_{eff} 值分佈圖	6.1.4-5
圖 6.1.4-2 驗證計算所得 k_{eff} 值對濃縮度之散佈圖	6.1.4-6
圖 6.1.4-3 驗證計算所得 k_{eff} 值對燃料棒間距之散佈圖	6.1.4-7
圖 6.1.4-4 驗證計算所得 k_{eff} 值對燃料丸直徑之散佈圖	6.1.4-8
圖 6.1.4-5 驗證計算所得 k_{eff} 值對燃料棒外徑之散佈圖	6.1.4-9
圖 6.1.4-6 驗證計算所得 k_{eff} 值對水鈾原子數比(H/U) 之散佈圖	6.1.4-10
圖 6.1.4-7 驗證計算所得 k_{eff} 值對硼酸濃度之散佈圖	6.1.4-11
圖 6.1.4-8 驗證計算所得 k_{eff} 值對叢集間距之散佈圖	6.1.4-12
圖 6.1.4-9 驗證計算所得 k_{eff} 值對硼片 10B 含量之散佈圖	6.1.4-13
圖 6.1.4-10 驗證計算所得 k_{eff} 值對 EALCF 之散佈圖	6.1.4-14
圖 6.1.5-1 密封鋼筒內外水密度變化對反應度影響	6.1.5-8
圖 6.1.5-2 燃料束在燃料方管內機械性偏移方向示意圖	6.1.5-9

附表目錄

表 6.1.2-1 本計畫待貯存核二廠核子燃料與 B8_62A 燃料型式基本資料	6.1.2-2
表 6.1.3-1 10B 有效面積密度與最小面積密度規格轉換表	6.1.3-12
表 6.1.3-2 護箱臨界評估分析項目與相關計算條件	6.1.3-13
表 6.1.3-3 材料物理密度	6.1.3-14
表 6.1.3-4 有效燃料區的材料組成	6.1.3-14
表 6.1.3-5 護箱的材料組成	6.1.3-15
表 6.1.4-1 186 個臨界驗證實驗參數涵蓋範圍	6.1.4-15
表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽	6.1.4-16
表 6.1.4-3 臨界實驗驗證的相關係數與 USL(對應 186 個臨界實驗).....	6.1.4-37
表 6.1.4-4 臨界實驗驗證的相關係數與 USL(去掉 3 個最高的 EALCF 實驗)	6.1.4-38
表 6.1.5-1 GE8x8-2、ANF8x8-2 與 B8_62A 燃料設計參數比較	6.1.5-10
表 6.1.5-2 護套間隙注水情形對反應度的影響	6.1.5-11
表 6.1.5-3 燃料匣厚度對反應度的影響	6.1.5-11
表 6.1.5-4 燃料束組件幾何尺寸對反應度的影響	6.1.5-12
表 6.1.5-5 濃縮度均勻分佈與非均勻分佈對反應度的影響	6.1.5-13
表 6.1.5-6 部份水淹蓋對反應度的影響	6.1.5-14
表 6.1.5-7 提籃結構製造公差與燃料束移動對反應度的影響 (獨立變數)....	6.1.5-14
表 6.1.5-8 提籃結構製造公差與燃料束移動對反應度的影響(合併變數).....	6.1.5-15
表 6.1.5-9 傳送護箱最大允許濃縮度與反應度	6.1.5-16
表 6.1.5-10 正常狀況、異常事件與意外事故下護箱臨界分析結果	6.1.5-16
表 6.1.5-11 燃料束製造公差與反應度	6.1.5-17
表 6.1.5-12 合併燃料束製造公差的最大反應度	6.1.5-17

一、臨界安全評估

(一) 前言

本節的內容是在說明護箱臨界安全評估的計算結果。其對象為內裝 87 束 GE8x8-2 或 ANF8x8-2 二種核子燃料之密封鋼筒，密封鋼筒分別置入傳送護箱及混凝土護箱中，評估在正常、異常與意外情形下之臨界安全。在整個分析過程中，無論是計算機程式模式的建立，還是各個系統參數的設定，其基本的邏輯採極限涵蓋分析法（bounding analysis），分析所有可能影響到臨界的變數，並判斷會造成最小反應度餘裕(反應度最大)的方向，在此方向上設定一個極限值來涵蓋，即可保證保守性並提升分析效率。例如本案待貯存燃料最大面平均濃縮度為 3.25 wt%，判斷會造成最小反應度餘裕(反應度最大)的方向為濃縮度增大，因此設定一個比 3.25 wt%還大的極限值 3.3 wt%，即可涵蓋所有濃縮度的燃料。同理以新燃料涵蓋燃耗燃料、以均勻濃縮度分佈涵蓋實際濃縮度分佈、以未含中子毒物燃料涵蓋所有含中子毒物的燃料，皆使用極限涵蓋分析法的原理，如此可以滿足法規對於要儘可能保守的要求，同時又能簡化問題的複雜度。

雖然本系統的設計與 MAGNASTOR-87 系統略有差異(請參照第三章表 3.1.1-1)，然而護箱系統的反應度大小主要取決於密封鋼筒內部的提籃環境設定，相對之下較不受密封鋼筒外部環境的影響，在此前提下，仔細審視表 3.1.1-1 各項設計差異，沒有屬於密封鋼筒內部環境設定的設計變更。其次，關於核子燃料部分，核二廠的 GE8x8-2 和 ANF8x8-2 兩種燃料型式亦均可被 MAGNASTOR-87 分析之 B8_62A 燃料型式所涵蓋。因此本系統之臨界安全分析，乃以 MAGNASTOR-87 系統及 B8_62A 核子燃料為主要元素，其結果符合保守涵蓋及簡化之原則。

本節首先說明設計準則和待貯存之用過核子燃料性質，依序為分析模式，包括計算機程式、基本假設、計算機程式模式、臨界評估的分析項目和材料的密度與組成；實驗驗證評估，包括護箱次臨界安全基準的說明、臨界實驗說明、驗證計算結果和 k_{eff} 值與主要系統參數的相關性分析；分析結果，

包括決定設計基準燃料、護套間隙注滿水對反應度的影響、燃料束各組件幾何尺寸製造公差對反應度的影響、燃料束均勻化與非均勻化濃縮度分佈對反應度的影響、密封鋼筒內部與外部水密度變化對反應度的影響、提籃結構各組件幾何尺寸製造公差與燃料束機械性偏移對反應度的影響、傳送護箱最大反應度與可容許最高濃縮度、護箱在正常狀況、異常事件和意外事故的臨界分析等；最後為結語。

分析結果顯示本案待貯存燃料在涵蓋各種極限反應度的情況下，符合法規限制並有充分餘裕。

(二) 設計準則

臨界評估所依據的法規和臨界設計規範分別為：在所有正常狀況、異常事件與意外事故下，有效中子增殖因數（ k_{eff} ）皆應小於 0.95，以滿足 10CFR72.124[1]和 10CFR72.236(c)[1]的法規要求，以及 NUREG-1536(Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems)[2]標準審查計劃第六章之要求。

核二廠目前所擁有的核子燃料計有 GE8x8-2、ANF8x8-2、ANF92、SPC9B、SPC10 與 ATRIUMTM-10 共六種燃料型式，其中 GE8x8-2、ANF8x8-2、ANF92、SPC9B 與 SPC10（只有 4 束）已全數退出爐心，並存放於燃料池中。本計畫之待貯存核子燃料為 GE8x8-2 和 ANF8x8-2 二種，表 6.1.2-1 列出了這兩種核子燃料型式的基本資料。其中對燃料束的反應度具主要影響的參數包括：鈾 235 的濃縮度，燃料丸有效堆疊密度（effective stacked density）、燃料丸直徑、護套厚度與燃料棒間距等。之所以會造成反應度的不同，可簡單歸納為兩個因素，一為鈾 235 的濃度，另一為燃料棒之間扮演緩和劑的水量。另外，在表中也分別列出了燃料束中單層晶格的最大平均濃縮度。

MAGNASTOR 有分析 7x7、8x8、9x9 和 10x10 各燃料型式，其中代號 B8_62A 這一燃料型式，和本計畫之待貯存核子燃料，同屬 8x8 列陣、62 根燃料棒和 2 根水棒的設計，B8_62A 核子燃料的基本資料列於表 6.1.2-1，經仔細比較燃料設計的各項主要參數後，確認 B8_62A 燃料型式可涵蓋本計畫待貯存之 GE8x8-2 和 ANF8x8-2，因此本分析以涵蓋此兩種形式的核子燃料型式 B8_62A 燃料型式做為設計基準燃料，詳見本章一、(五).1 節。

表 6.1.2-1 本計畫待貯存核二廠核子燃料與 B8_62A 燃料型式基本資料

燃料棒參數	GE8x8-2 ^{*1}	ANF8x8-2 ^{*2}	B8_62A ^{*3}
護套外直徑, cm	1.2268	1.2294	1.2268
護套內直徑, cm	1.0642	1.0514	1.0795
護套材質	Zr-2	Zr-2	Zr-4
有效堆疊 (stacked) 密度, g/cm ³	10.32	10.36	10.52
燃料丸直徑, cm	1.0414	1.030	1.0566
燃料棒高度, cm	415.823	415.097	404.005
軸向最高面平均 (peak-planar-average) 濃縮度, wt% U-235	3.03	3.25	≥ 3.3
燃料束參數	GE8x8-2	ANF8x8-2	B8_62A
燃料束最大平均濃縮度, wt% U-235	3.03	3.25	最小 3.3
最大裝填鈾重, MTU	0.183	0.176	0.192
燃料棒陣列	8x8	8x8	8x8
燃料棒數	62	62	62
有效燃料長度, cm	381.0	381.0	381.0
燃料棒間距, cm	1.6154	1.6154	1.6299
燃料束高度, cm	447.446	447.152	443.194
燃料束寬度, cm	13.355	13.178	13.338
上繫板高度, cm	19.05	19.05	19.05
上繫板與燃料頂端間距, cm	2.451	2.769	2.934
燃料棒上端塞, cm	NA	5.588	0.955
燃料棒上氣室高度, cm	24.079	25.461	20.521
燃料棒下氣室高度, cm	0.0	0.0	0.0
燃料棒下端塞, cm	4.415	3.048	1.532
下繫板與燃料底端間距, cm	0.0	0.0	0.0
下繫板高度, cm	17.120	16.891	17.148
水棒數	2	2	2
水棒材質	Zr-2	Zr-2	Zr-4
水棒外直徑, cm	1.501	1.229	1.501
水棒內直徑, cm	1.348	1.051	1.348
燃料匣內距, cm	13.246	13.246	13.406
燃料匣厚度, cm	0.3048	0.3048	0.3048
燃料匣材質	Zr-4	Zr-4	Zr-4

*1 資料來源：GE NEDE-21831/21832/21828/22184

*2 資料來源：XN-NF-83-52/XN-NF-86-80

*3 資料來源：NAC, NewGen Transfer and Storage Criticality Analysis, 71160-6001 Rev. 0. [8]

(三) 分析模式

建立本分析模式的目的，是為了讓整個臨界計算有所依循，藉由通盤考慮計算的流程，以確保臨界計算的過程與結果都能符合法規的要求。以下分別說明計算機程式、基本假設、計算機程式模式、分析項目和材料的密度與組成。

1. 計算機程式

MCNP[3]程式是由美國 LANL (Los Alamos National Laboratory) 發展出的 MCN (Monte Carlo Neutron Transport Code) 程式，加入計算光子遷移程式 MCG 和 MCP 後改名而來，是一個以蒙地卡羅方法來進行臨界分析的程式。蒙地卡羅方法是以數學模式來追蹤記錄每個中子，從產生到被吸收或逃逸其間每一次的碰撞情形，碰撞後的能量、角度及位置改變，均由從碰撞截面推導而得的機率分佈來決定，最後再以統計的方法，分析所有中子的碰撞歷史來得到所需的計算結果。

因為是採用統計的方法，所以理論上追蹤的中子數目越多統計誤差就會越低。MCNP 除了在單機上計算外，也能多台單機藉由網路相連進行分散式計算，大幅縮短計算時間。

MCNP 程式在幾何描述部分提供了相當多樣的彈性，幾乎可以百分之百依照實際的形狀來建立三維模擬，對於具有高度重複性的幾何形狀，例如燃料束，也提供了單元結構可重複使用 (repeated structure) 模式，可以大幅省去繁複的輸入，減少出錯的機會。一旦模擬完畢，還可藉由繪圖 (plot) 這個功能，在電腦上要求 MCNP 繪出任一方向任一位置的二維剖面圖；這對使用者而言，可將模擬結果與實體做比較，是一項非常實用的檢查工具。

MCNP 程式所搭配使用的中子截面庫為連續能量，所以沒有多群截面庫要依分析問題的不同，來選擇適當的中子通率做加權平均的問題。由於在 MCNP 4B 版本之前並沒有考慮延遲中子，所有核分裂產生的中子皆假設為瞬時中子，而實際上延遲中子會晚於瞬時中子產生，且能譜也不同。延遲中子約佔總體中子 1% 左右，造成約 0.1% 的反應度誤差。自版本 4C 之後，所附的

可裂材中子截面已含有延遲中子的能譜與時間差，因而臨界計算所得的 k_{eff} 值已可涵蓋此~1%的貢獻。

本臨界計算是以最新版本 MCNP5，搭配其所附帶的中子截面庫[4]來進行，而該程式與中子截面庫組合的驗證計算，請見本節第 4 小節標準臨界實驗驗證計算。

2. 基本假設

在進行臨界評估的各項計算工作時，全體適用的保守假設，說明如下：

- 使用新燃料，不採計燃耗效應；
- 燃料的物理密度以 UO_2 理論密度的 96% 來計算 ($0.96 \times 10.96 = 10.52 \text{ g/cm}^3$)；
- 燃料濃縮度使用軸向最高面平均濃縮度且均勻化分佈；
- 除燃料匣（假定其四個角落為直角）之外，不模擬燃料束其它的結構材料，如上下端板與間隔板等；
- 不模擬燃料棒內的中子毒素，此保守假設會使新燃料反應度大幅上升；
- 燃料束護套基本上是完整的，從爐心破損率記錄顯示絕大多數裝載之燃料護套並無破損而讓水有注入燃料丸與護套間隙的可能。分析時另假設水可注入上述空隙，說明如本章一、(五).2 節；
- 緩和劑假設為可變化密度的水。設計基準下溫度為 293K，密度為 0.9982 g/cm^3 。燃料、燃料護套及其他結構材料溫度均假設為 293K；
- 固定在提籃內的中子吸收板，其 ^{10}B 的最小有效面積密度為 0.020 g/cm^2 ，此為已乘上法規要求只能採用 75% 中子吸收效能後的 ^{10}B 面積密度。在本節(五).8 分析傳送護箱最高允許濃縮度時也使用了有效面積密度 0.027 g/cm^2 與 0.0225 g/cm^2 的中子吸收板，表 6.1.3-1 列出了 ^{10}B 有效面積密度與廠商製造規格最小 ^{10}B 面積密度的轉換結果。依 NUREG-1536 說明，BORAL 可符合 75% 中子吸收效能的要求，MMC 與 Borated Aluminum 可符合 90% 中子吸收效能的要求，但須提出相關驗證報告資料，確認其滿足 NUREG-1536 所述的要求；

- 依據本章第二節結構分析，燃料束及提籃在正常狀況、異常事件和意外事故下均能維持其結構且都不會發生顯著的永久變形。本章三、(六).4 節的假想傾倒分析結果顯示，燃料方管的對角線長度改變量最大不超過 0.254 mm，而在燃料方管的對角線長度製造公差的分析結果顯示，此改變量對反應度的影響在統計上不具意義；
- 不鏽鋼 SS 304/304L (dual-certified)及碳鋼的組成成分以 SCALE 4.4 標準成分資料庫(standard composition library)[5]為準；
- 由本章六、(二).10 節可知在設計基準情況下不會有發生傾倒事故的可能，所以燃料方管結構在設計基準情況下不會發生永久變形。而本章三、(六).4 節的假想傾倒分析結果顯示，燃料方管的中間區域不會有顯著的永久變形發生，但燃料方管的頂部有輕微的永久變形發生。假想傾倒分析中，燃料方管頂部的變形十分微小，由於在燃料方管的頂部中子洩漏率大，中子的重要性較低，因此不會有顯著的反應度影響；
- 由燃料方管與側邊支撐鉸件與彎角支撐鉸件圍成的提籃具有 89 個開口，其中兩個開口在通風口及排水孔之下而不放置燃料束。但在分析中則保守假設 89 個開口位置都放置有燃料束；

3. 計算機程式模式

密封鋼筒的外殼由 SS 304/304L (dual-certified)不鏽鋼構成，軸向長度 4870.5 mm，其外直徑為 1828.8 mm，圓柱面厚度 12.7 mm，底座厚度 69.9 mm，上蓋厚度 228.6 mm，如圖 6.1.3-1。

密封鋼筒內部中空部分為提籃結構，該結構主要由 45 個燃料方管及四個彎角支撐鉸件及四個側邊支撐鉸件組成 89 個開口，其中一個放排水管，一個當排氣口，個別用過核子燃料束則是存放在 87 個開口裡面，如圖 6.1.3-2。燃料方管的材質為碳鋼無電鍍鎳，高度 4217.9 mm，內寬度 148.8 mm，外側對角線長度 221.5 ~222.5 mm。燃料方管的內側各貼有四片中子吸收版，長度 4186.2 mm，寬度 134.6 mm，厚度 2.5 mm，由於外圍的中子大部分會直接洩漏到密封鋼筒外，提籃外圍的中子吸收板效益不大，因此在外圍的 24 片中子吸收板可以不含硼的鋁片替代，可替代的中子吸收板位置如圖 6.1.3-3 所示。

在本分析中，中子吸收板材料暫使用 BORAL，實際上可視需要選擇 BORAL、MMC 或 Borated Aluminum，由於使用相同的 ^{10}B 有效面積密度分析，因此不同的中子吸收板材質並不會對臨界分析造成影響。圖 6.1.3-4 為彎角支撐鉸件(corner weldment)與側邊支撐鉸件(side weldment)的示意圖，在提籃結構橫切面圖上下左右四個方向各別有側邊支撐鉸件支撐，長度 4559.3 mm，寬度為 442.0 mm，兩側與燃料方管相鄰的部份厚度為 6.3 mm，中間未與燃料方管相鄰的部份寬度為 167.4 mm，厚度為 15.9 mm。彎角支撐鉸件是由連續的面與一個圓弧面組合而成的碳鋼結構，與側邊支撐鉸件共同支撐提籃結構。

傳送護箱內壁及外壁是由碳鋼材料組成，圓柱面外殼由鉛及 NS-4-FR 材料組成，提供加馬射線及中子屏蔽，底部屏蔽門則是由碳鋼組成，如圖 6.1.3-5。傳送護箱外直徑 2235.2 mm，不包含底部屏蔽門的高度為 4889.5 mm，底部屏蔽門的高度為 127.0 mm。

混凝土護箱的金屬部份為碳鋼材料，混凝土的密度為 2.323 g/cm^3 ，高度為 5990.0 mm，外直徑為 4250.0 mm，內直徑為 2020.0 mm，上下分別有空氣出風口及進風口，口徑分別為 $1295.0 \text{ mm} \times 90.0 \text{ mm}$ 及 $1296.0 \text{ mm} \times 115.0 \text{ mm}$ 。混凝土護箱穿過進風口，出風口的縱切面如圖 6.1.3-6。

MCNP 的幾何模擬方式，可將系統分割成多個獨立物件，再將這些物件排列合併成所要建立的模型。因此可將混凝土護箱或傳送護箱、密封鋼筒、燃料提籃及燃料束都視為一獨立物件建立，方便修改及檢查。

三維有限系統詳細模式的護箱/密封鋼筒/提籃結構/燃料模型可以階段式清楚建立。第一階段建立基本的燃料束，包括燃料棒、水棒及上下繫板(end-fitting)；第二階段建立密封鋼筒內的提籃結構，提籃結構是由燃料方管、中子吸收板及側邊支撐鉸件與彎角支撐鉸件組合而成；第三階段先把燃料束放置在密封鋼筒內的空洞位置並排列好，再把建立完成的提籃結構以覆蓋的方式放置在燃料束與燃料束之間空白的位置；第四階段把密封鋼筒外殼和上蓋建立在提籃結構的外圍，完成密封鋼筒的模型；第五階段再將密封鋼筒放置到傳送護箱或混凝土護箱內部；最後，傳送護箱與混凝土護箱的表面往外 20 公分處再設置一個可調整直徑的圓柱形反射邊界。

4. 分析項目

由於護箱系統的反應度大小主要取決於密封鋼筒內部的環境設定，相對之下較不受密封鋼筒外部環境的影響，因此屬於密封鋼筒內部提籃環境設定之靈敏度分析的項目，僅針對傳送護箱為之，最後一項分析項目則為結合各項靈敏度分析結果，驗證傳送護箱與混凝土護箱在正常、異常及意外情況下有效增殖因素(k_{eff})皆可符合法規要求。表 6.1.3-2 列出了所有臨界評估的分析項目與重要參數設定，以下分別說明各項分析工作：

- (1). 決定設計基準燃料—說明本系統的 B8_62A 燃料型式可以涵蓋本次待貯存的 GE8x8-2 及 ANF8x8-2 核子燃料。以下各項分析項目均以設計基準燃料為護箱裝載的燃料，其初始軸向最高面平均濃縮度 (peak-planar-average) 假定為 3.3 wt% ^{235}U 。
- (2). 護套間隙注滿水對反應度的影響—護套間隙注滿水可提高系統反應度，此項結果印證了系統是處在緩和和不足的情況下。
- (3). 燃料匣厚度變化對反應度的影響—BWR 燃料束允許將燃料匣拆卸後再儲存，因此需分析燃料匣厚度分別為 3.048 mm (120 mil)、2.032 mm (80 mil) 以及移除燃料匣對反應度的影響。本次待貯存的 GE8x8-2 及 ANF8x8-2 核子燃料使用的燃料匣厚度均為 3.048 mm (120 mil)，貯存時連同燃料匣一併貯存。
- (4). 燃料束各組件幾何尺寸製造公差對反應度的影響—找出使系統反應度最大的幾何尺寸組合，以最大值及最小值尺寸計算，包含燃料棒間距、燃料棒外直徑、燃料護套厚度及水棒寬度或直徑及厚度。分析結果顯示最小燃料棒外直徑、最小燃料護套厚度、最大燃料棒間距、最小水棒直徑及厚度之組合可使燃料束的反應度最大，故將此組合稱為反應度最大的燃料束設置/幾何組態。
- (5). 燃料束均勻化與非均勻化濃縮度分佈對反應度的影響—由於 BWR 的燃料束其濃縮度在軸向與徑向並不是均勻的，為了更保守並簡化在臨界計算時模擬各個不同濃縮度分佈的困擾，以燃料束的初始軸向最高面平均濃縮度與實際燃料束的濃縮度分佈比較，證明均勻化模式較為保守。

- (6). 密封鋼筒內部與外部水密度變化對反應度的影響－分析結果顯示密封鋼筒內部注滿水時系統的反應度最大，而密封鋼筒外部的的水密度變化對系統反應度的影響不明顯。
- (7). 提籃結構幾何尺寸製造公差與燃料束機械性偏移對反應度的影響－幾何尺寸製造公差包括燃料方管與中子吸收板，燃料方管的角落有聯結插銷固定，不會有燃料方管間的偏移，僅需考慮燃料束在燃料方管內的機械性偏移。分析結果顯示最小燃料方管寬度、最小燃料方管對角線長度、最大燃料方管厚度、中子吸收板最小寬度及最大厚度和燃料束徑向朝內偏移之組合可使系統反應度最大，故將此組合稱為反應度最大的提籃設置/幾何組態。
- (8). 傳送護箱最大反應度與可容許最高濃縮度－結合反應度最大的燃料束設置/幾何組態、反應度最大的提籃設置/幾何組態與減少中子吸收板數目及雙排鉚釘的設置，在滿足法規要求的前提下，決定分別對應中子吸收板 ^{10}B 有效面積密度 0.027 g/cm^2 ， 0.0225 g/cm^2 及 0.02 g/cm^2 之容許最高濃縮度。
- (9). 護箱在正常狀況、異常事件與意外事故的臨界分析－設計基準燃料的濃縮度為 $3.3 \text{ wt}\% \text{ }^{235}\text{U}$ ，結合初始（反應度最大的）燃料束設置/幾何組態、反應度最大的提籃設置/幾何組態，中子吸收板 ^{10}B 有效面積密度使用 0.020 g/cm^2 ，在這些條件下，以展示本系統貯存 GE8x8-2 及 ANF8x8-2 核子燃料（最高濃縮度為 $3.25 \text{ wt}\% \text{ }^{235}\text{U}$ ）時，系統具有額外的安全餘裕。

5. 材料密度與組成

材料的組成成分主要從 SCALE 4.4 的材料資料庫[5]取得，表 6.1.3-3、表 6.1.3-4 及表 6.1.3-5 為在臨界計算中所使用的材料密度與組成。

有關中子吸收板的初始吸收效力驗證，請參見第五章附錄 A，中子吸收劑的中子衰減測試。

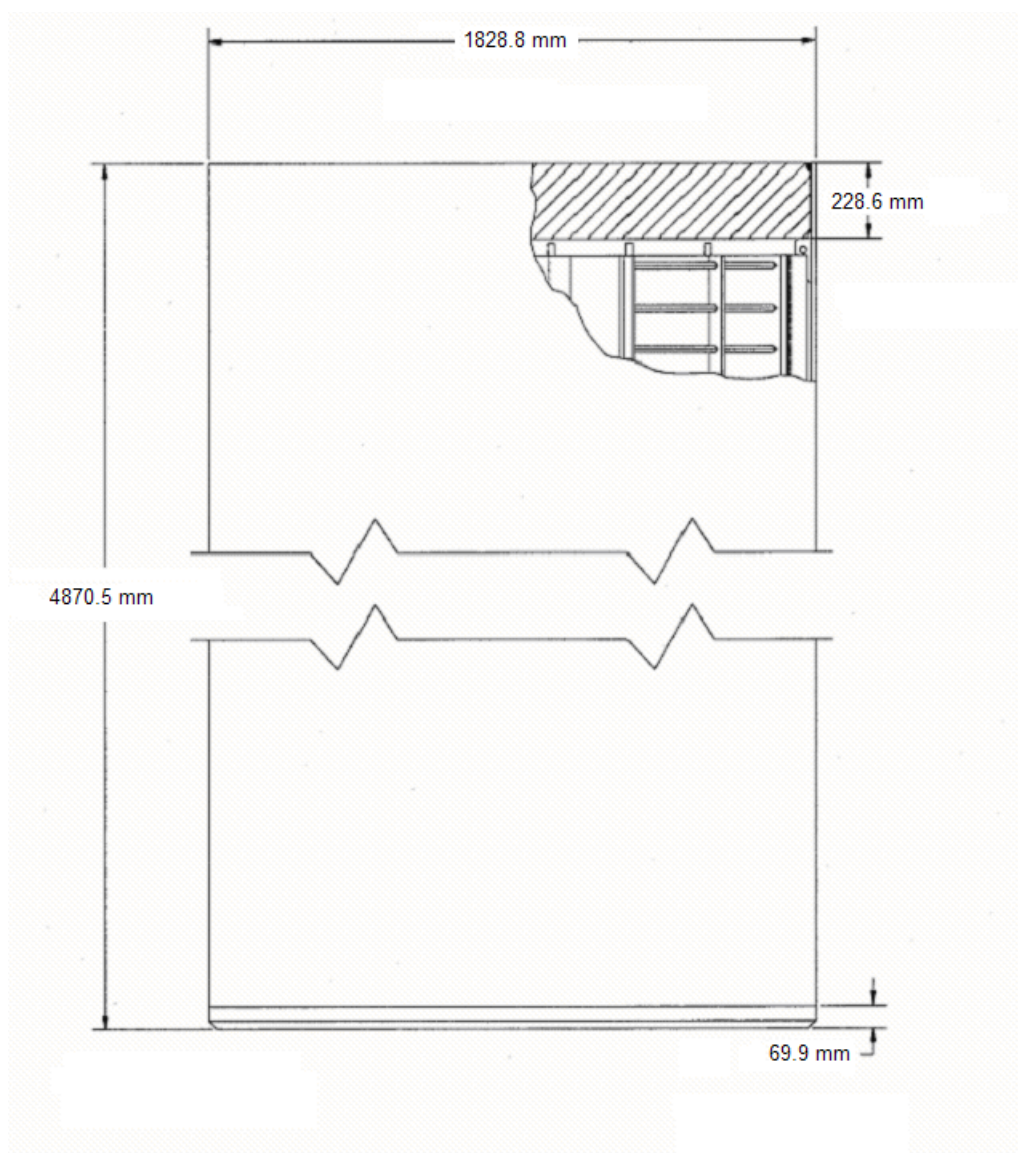


圖 6.1.3-1 密封鋼筒縱切面

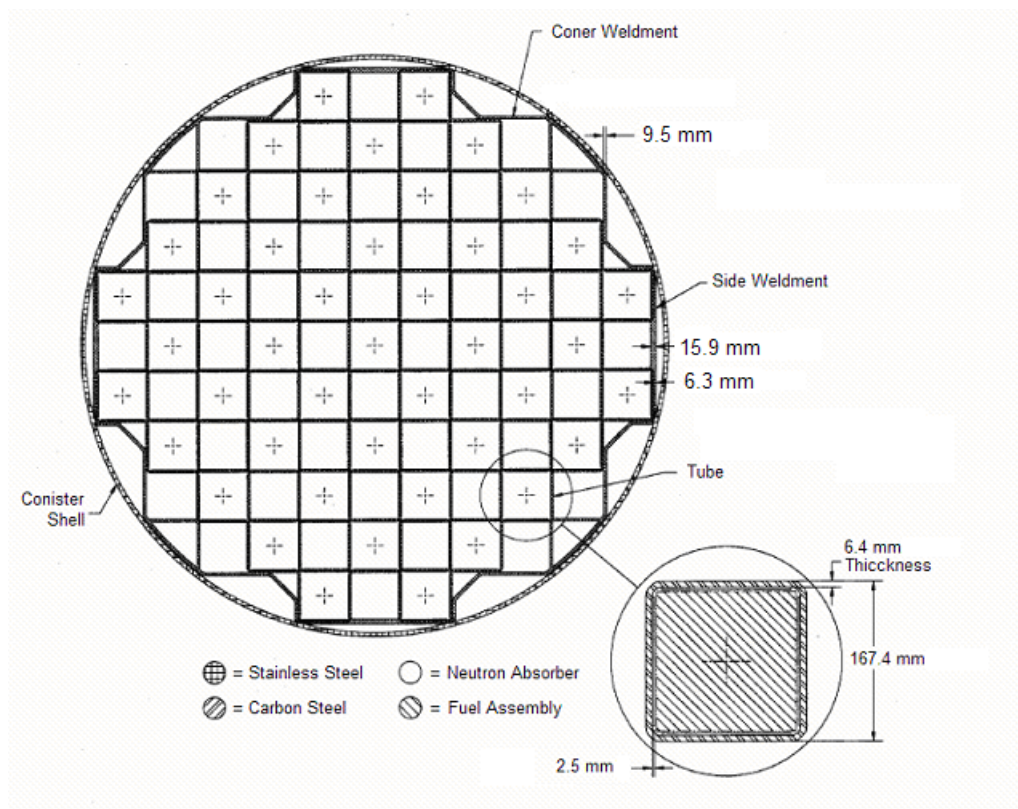


圖 6.1.3-2 提籃結構橫切面

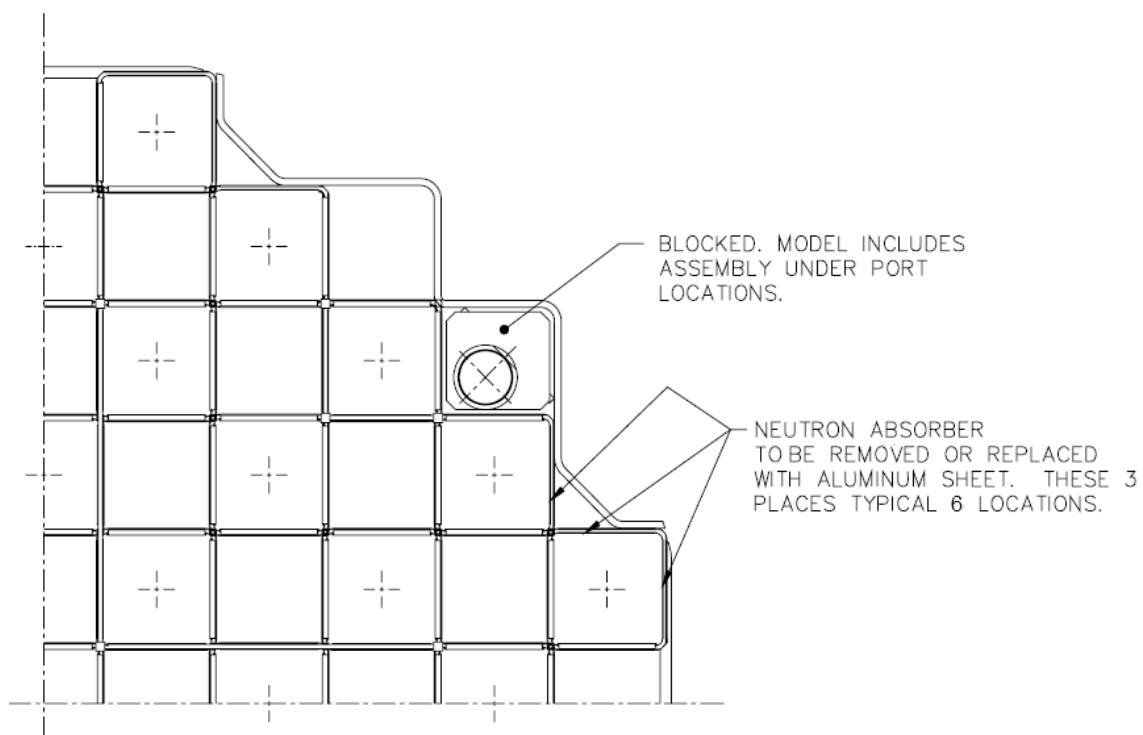


圖 6.1.3-3 可移除或替換之中子吸收板位置

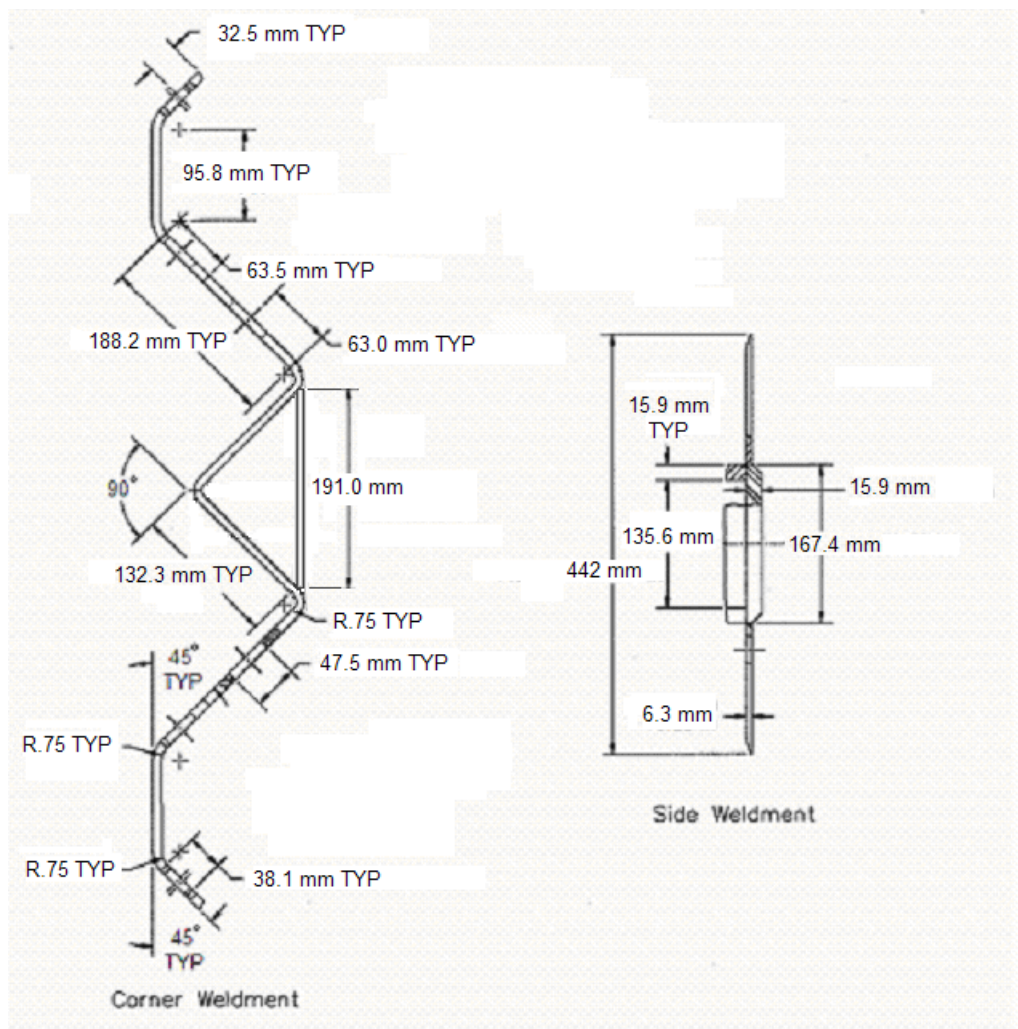


圖 6.1.3-4 彎角支撐鉚件與側邊支撐鉚件

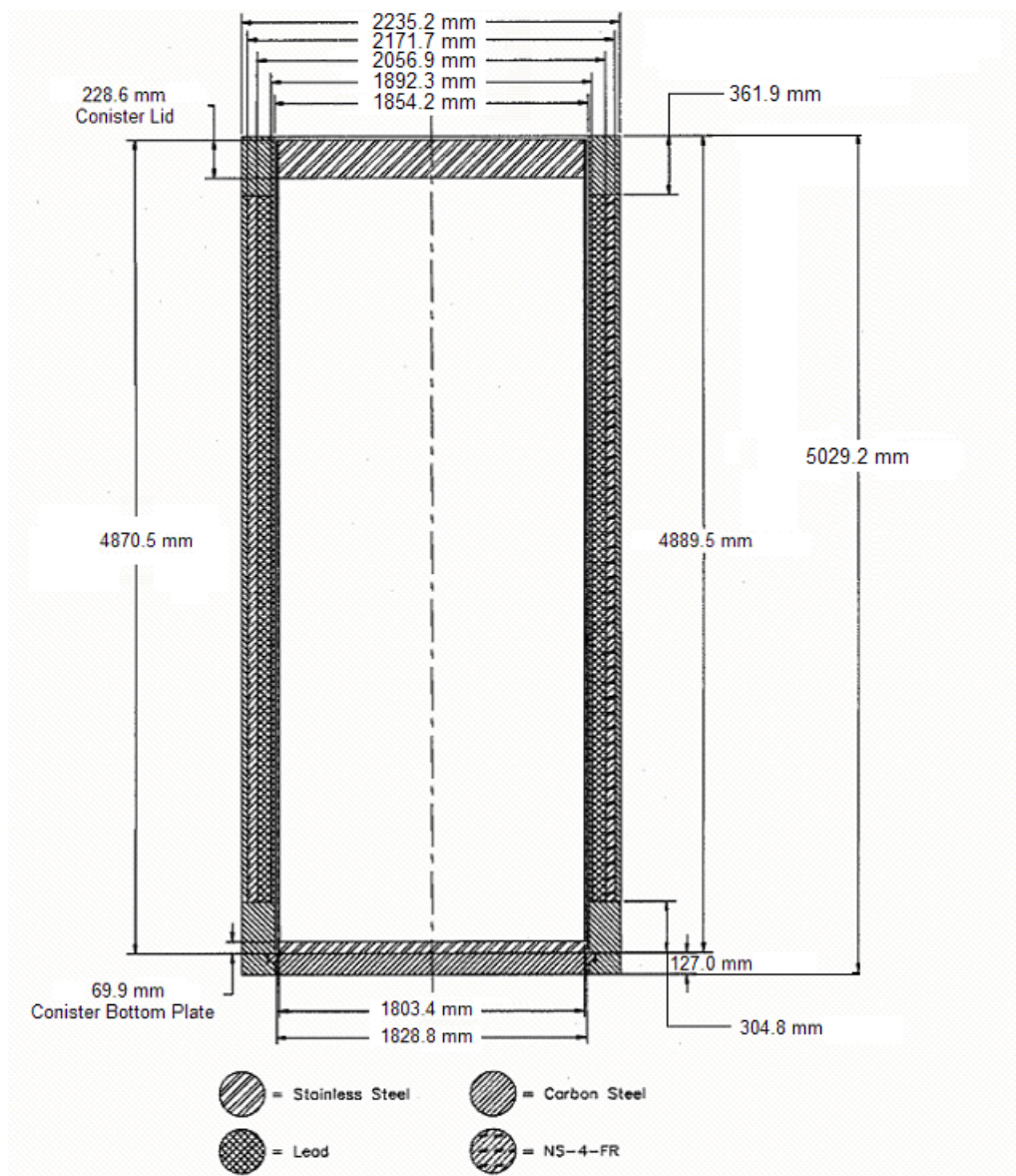


圖 6.1.3-5 傳送護箱縱切面

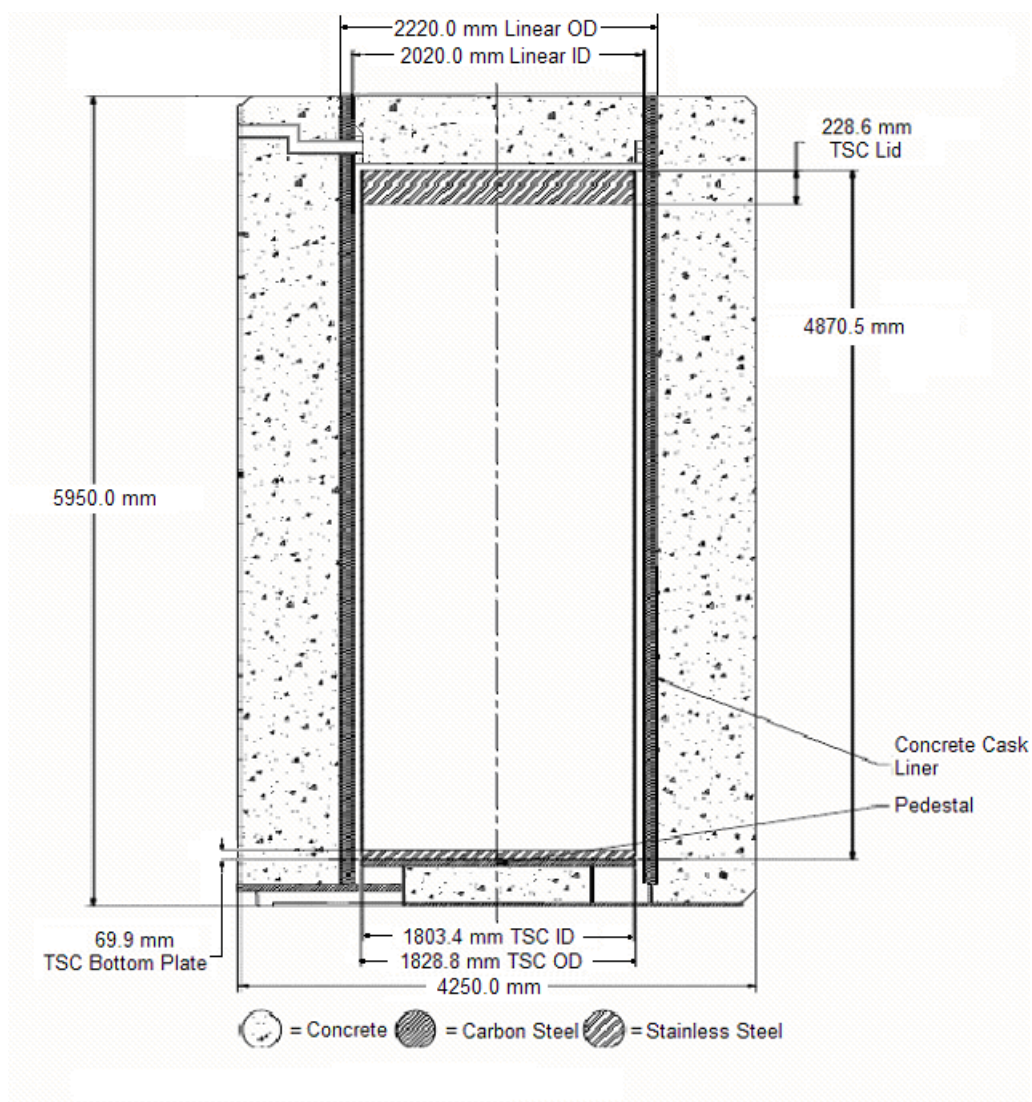


圖 6.1.3-6 混凝土護箱縱切面

表 6.1.3-1 ^{10}B 有效面積密度與最小面積密度規格轉換表

^{10}B 有效面積密度 g/cm^2	最小 ^{10}B 面積密度 g/cm^2 (廠商製造規格)	
	若法規允許取用 75%吸收效能	若法規允許取用 90%吸收效能
0.027	0.036	0.030
0.0225	0.030	0.025
0.020	0.0267	0.0223

表 6.1.3-2 護箱臨界評估分析項目與相關計算條件

臨界評估 分析項目 計算條件	護套間隙注滿水對反應度的影響	燃料匣厚度變化對反應度的影響	燃料束各組件幾何尺寸對反應度的影響	燃料束均勻化與非均勻化濃縮度分佈對反應度的影響	密封鋼筒內部與外部水密度變化對反應度的影響	提籃結構幾何尺寸製造公差與燃料束機械性偏移對反應度的影響	傳送護箱最大反應度與可容許最高濃縮度	護箱在正常狀況、異常事件與意外事故的臨界分析
計算機程式與中子截面庫	MCNP5 & latest data librarie							
計算機程式模式	三維有限系統詳細模式							
±z 邊界條件	反射邊界							
±r 邊界條件	反射邊界							
濃縮度(wt% ²³⁵ U)	3.3	3.3	3.3	實際分佈、3.3	3.3	3.3	3.8、3.6 和 3.5	3.3
I.C.* ¹ 水密度(g/cm ³)	0.9982	0.9982	0.9982	0.9982	0.0001~0.9982	0.9982	0.9982	0.9982
O.C.* ² 水密度(g/cm ³)	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001~0.9982	0.0001	0.0001	0.0001
護套間隙水密度(g/cm ³)	0.0001 & 0.9982	0.0001	0.9982	0.0001	0.9982	0.0001	0.9982	0.9982
模擬燃料束數目	89							
燃料束幾何尺寸設置方式	水鈾比最大	水鈾比最大	找出反應度最大的設置方式	水鈾比最大	水鈾比最大	水鈾比最大	水鈾比最大	水鈾比最大
提籃內部設置方式(包含燃料束機械偏移)	標準	標準	標準	標準	標準	找出反應度最大的設置方式	反應度最大	反應度最大
中子吸收板數目	減少 24 片	減少 24 片	減少 24 片	減少 24 片	減少 24 片	減少 24 片	減少 24 片	減少 24 片
¹⁰ B 有效密度(g/cm ²)	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.020	0.027、0.0225 和 0.020	0.020
鉗接釘(每層鉗接釘數/排)	雙排(14/排)	雙排(14/排)	雙排(14/排)	雙排(14/排)	雙排(14/排)	雙排(14/排)	雙排(14/排)	雙排(14/排)
護箱種類	傳送	傳送	傳送	傳送	傳送	傳送	傳送	傳送/混凝土

*1：密封鋼筒內部 *2：密封鋼筒外部

表 6.1.3-3 材料物理密度

材料	物 理 密 度 (g/cm ³)
UO ₂	10.522
Zircaloy	6.56
H ₂ O	0.9982
Stainless steel	7.94
Carbon steel	7.821
Lead	11.344
Aluminum	2.702
Neutron Absorber (0.027 g/cm ²)*	2.35782
Neutron Absorber (0.0225 g/cm ²)*	1.96485
Neutron Absorber (0.020 g/cm ²)*	1.74662
NS-4-FR	1.632
Concrete	2.322

*Neutron Absorber 物理密度暫採用 BORAL 材料值

表 6.1.3-4 有效燃料區的材料組成

材料	元 素	原子密度 (atoms/barn-cm)
UO ₂ 濃縮度3.3 wt%* ¹	²³⁵ U	7.84×10 ⁻⁴
	²³⁸ U	2.27×10 ⁻²
	O	4.69×10 ⁻²
Zircaloy	Fe	8.84×10 ⁻⁵
	Cr	7.60×10 ⁻⁵
	N	1.41×10 ⁻⁴
	Zr	4.25×10 ⁻²
	Sn	4.99×10 ⁻⁴
H ₂ O	H	6.67×10 ⁻²
	O	3.34×10 ⁻²

*1) 計算時濃縮度會改變，在此僅列出其中一種參考

表 6.1.3-5 護箱的材料組成

材料	元素	原子密度 (atoms/barn-cm)
Aluminum	Al	6.03×10^{-2}
Stainless Steel	Cr	1.75×10^{-2}
	Fe	5.95×10^{-2}
	Ni	7.77×10^{-3}
	Mn	1.74×10^{-3}
Carbon steel	C	3.92×10^{-3}
	Fe	8.35×10^{-2}
Lead	Pb	3.30×10^{-2}
NS-4-FR	H	5.8508×10^{-2}
	O	2.6107×10^{-2}
	C	2.2600×10^{-2}
	N	1.3904×10^{-3}
	Al	7.8003×10^{-3}
	^{11}B	3.3665×10^{-4}
	^{10}B	9.1385×10^{-5}
Concrete	O	4.6522×10^{-2}
	Si	1.6783×10^{-2}
	H	1.3879×10^{-2}
	Na	1.7643×10^{-3}
	Ca	1.5356×10^{-3}
	Fe	3.5063×10^{-4}
	Al	1.7625×10^{-3}
材料	元素	重量比
Neutron Absorber*	Al	5.656×10^{-1}
	^{10}B	6.011×10^{-2}
	^{11}B	2.799×10^{-1}
	C	9.430×10^{-2}

*Neutron Absorber 組成暫採用 BORAL 材料值

(四) 實驗驗證評估

依據法規的要求，用來進行護箱設計與乾式貯存臨界評估的電腦程式，必須要用標準臨界實驗進行驗證，其目的在於確認所用的程式於該類幾何與材質的組合下，搭配所選用的中子截面庫整體是否適當；而分析計算結果所獲得的平均偏差值（mean of the bias）與該值的標準偏差（standard deviation of the mean）會應用在護箱臨界分析的結果上，因而此驗證計算的重要性不言而喻。

首先說明護箱次臨界的安全基準，本報告所採用的標準臨界實驗及驗證計算的結果與分析，亦分別說明於後。

1. 護箱次臨界安全基準簡介

依據 NUREG/CR6361 (Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Packages) [6]第 4 節關於護箱次臨界安全基準的說明，該基準可以(1)式來表示：

$$k_s \leq k_c - \Delta k_s - \Delta k_c - \Delta k_m \quad (1)$$

其中：

k_s = 考慮各種正常狀況或意外事故下，護箱臨界評估所得的最大 k_{eff} 值，

k_c = 標準臨界實驗驗證計算所得的平均 k_{eff} 值。如果計算所得的 k_{eff} 值與實驗系統的某個獨立參數顯現相關的趨勢，那麼應以外插最佳擬合計算所得 k_{eff} 值的方式來求取 k_c ，

Δk_s = 涵蓋與 k_s 相關的所有不準度（uncertainty），包括求取 k_s 時所得的統計誤差、材料和製造的容許差異限度（tolerance）和受限於計算方法而造成幾何與材料上的模擬誤差，

Δk_c = 涵蓋與 k_c 相關的所有不準度，包括標準臨界實驗的實驗誤差、求取 k_c 時所得的統計誤差、對臨界實驗的系統參數外插 k_c 時所得的誤差和受限於計算方法而造成幾何與材料上的模擬誤差，

Δk_m = 為確保 k_s 次臨界額外設定的次臨界餘裕，法規要求為 5%。

這些不準度若彼此沒有依存關係，要以統計的規則來結合，即平方相加再開根號；若彼此相關，則直接相加。

將(1)式重寫成(2)式：

$$k_s \leq 1 - \Delta k_m - \Delta k_s - (1 - k_c) - \Delta k_c \quad 2)$$

定義偏差值 $\beta = 1 - k_c$ ，令 $\Delta\beta = \Delta k_c$ ，代入(2)式而得(3)式：

$$k_s + \Delta k_s \leq 1 - \Delta k_m - \beta - \Delta\beta \quad 3)$$

而(3)式可再改寫為：

$$k_s + \Delta k_s \leq \text{Upper Subcritical Limit (USL)} \quad 4)$$

$$\text{USL} = 1 - \Delta k_m - \beta - \Delta\beta \quad 5)$$

此為 NUREG/CR6361 第四節的 USL 基準。

2. 標準臨界實驗說明

本報告模擬的臨界實驗是從 International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments[7]裡篩選適合用過燃料護箱的實驗做 MCNP 驗證，篩選的條件如下：

- 燃料材料：二氧化鈾
- 鈾 235 濃縮度：最大 5 wt% ^{235}U
- 燃料棒幾何形狀：圓柱形
- 燃料束幾何：方形陣列

總共選出 186 個實驗。每個實驗在下列不同的條件下藉由調整叢集間距、硼酸濃度、來達到臨界，這些條件包括：叢集的大小與燃料棒排列方式、燃料棒間距、叢集間放置的中子吸收板材質與反射體。這 186 個實驗所涵蓋的燃料濃縮度、燃料棒間距、中子吸收板與水鈾體積比的範圍如表 6.1.4-1 所列。表 6.1.4-2 為所有實驗的主要參數、實驗不準度與 MCNP5 程式計算結果含 k_{eff} 及 σ ，圖 6.1.4-1 為 186 個 k_{eff} 值的分佈圖。MCNP5 以每週期(中子代間時間)2000 顆粒子，總週期 530 並忽略前 30 個週期設置，所有 MCNP 計算的統計誤差均

維持在 $\pm 0.2\%$ 以內，每個 k_{eff} 值計算結果均通過 MCNP 內建的統計測試，並且每個實驗的可裂材區域 MCNP 均有取樣到。

3. 驗證計算結果

在 NUREG/CR-6361 的說明中，USLSTATS 是一個可計算 USL 的程式，當輸入臨界實驗的 k_{eff} 與實驗參數時，程式會以” Confidence Band with administrative Margin (USL-1)”方法計算出 USL 與實驗參數的關係式。本報告以此程式做為計算 USL 的工具，並令 $\Delta k_m = 0.05$ 。

依據 NUREG/CR-6361 的建議，以簡單線性迴歸法 (Simple Linear Regression) 分析驗證計算的 k_{eff} 值與主要系統參數的相關性，並以最相關的係數來計算 β 與 $\Delta\beta$ 。分析的參數有：燃料濃縮度 (wt % ^{235}U)、燃料棒間距、燃料丸直徑、燃料棒外徑、水鈾比 (H/U atom ratio)、硼酸濃度、叢集間距、硼片 ^{10}B 含量及促成分裂之中子能量昏度 (Energy of average neutron lethargy causing fission, EALCF)。使用 USLSTATS 程式以 186 臨界實驗各項參數與 k_{eff} 為輸入參數計算 USL，結果列於表 6.1.4-3，最相關的參數為 EALCF，USL 的最小值為 0.9372。

實驗編號 14-5、14-6、14-7 這 3 個 EALCF 中子能量昏度太高的實驗與其餘 183 個實驗所作成的最接近線相差甚遠，如加入這 3 個實驗畫出最接近線則會使直線的斜率增加，這會使得 USL 在 EALCF 高的地方更高，因此本分析也考慮排除此 3 個實驗的情況。各參數與 k_{eff} 之散佈圖列於圖 6.1.4-2 至圖 6.1.4-10。其中叢集間距只針對 137 個有兩個以上的叢集的實驗；其他的參數則扣除 3 個 EALCF 中子能量昏度太高的實驗，以 183 個實驗作圖而成。

圖 6.1.4-2 至圖 6.1.4-10 還顯示線性回歸分析之回歸線與相關係數 (R)。如果 R 為 +1，代表完全正相關；若 R 為 -1，代表完全負相關；若 R 為 0，代表兩者線性相關的程度非常弱。由圖可知最大的相關係數為 0.139，最小為 0.008，所有參數並沒有統計上顯著的相關趨勢。

由於沒有任何參數與 k_{eff} 在統計上有顯著的相關趨勢，因此可將所有實驗參數利用 USLSTATS 程式計算出 USL，在從中取最小的 USL 做為臨界安全分析上限，如此為最保守的做法。所有參數與 USL 計算結果列於表 6.1.4-4，

USL 的最小值為 0.9376，略高於以 186 個臨界實驗計算出來的 0.9372，因此還是保守地將 USL 設為 0.9372，此值將做為系統臨界分析的反應度限制值。

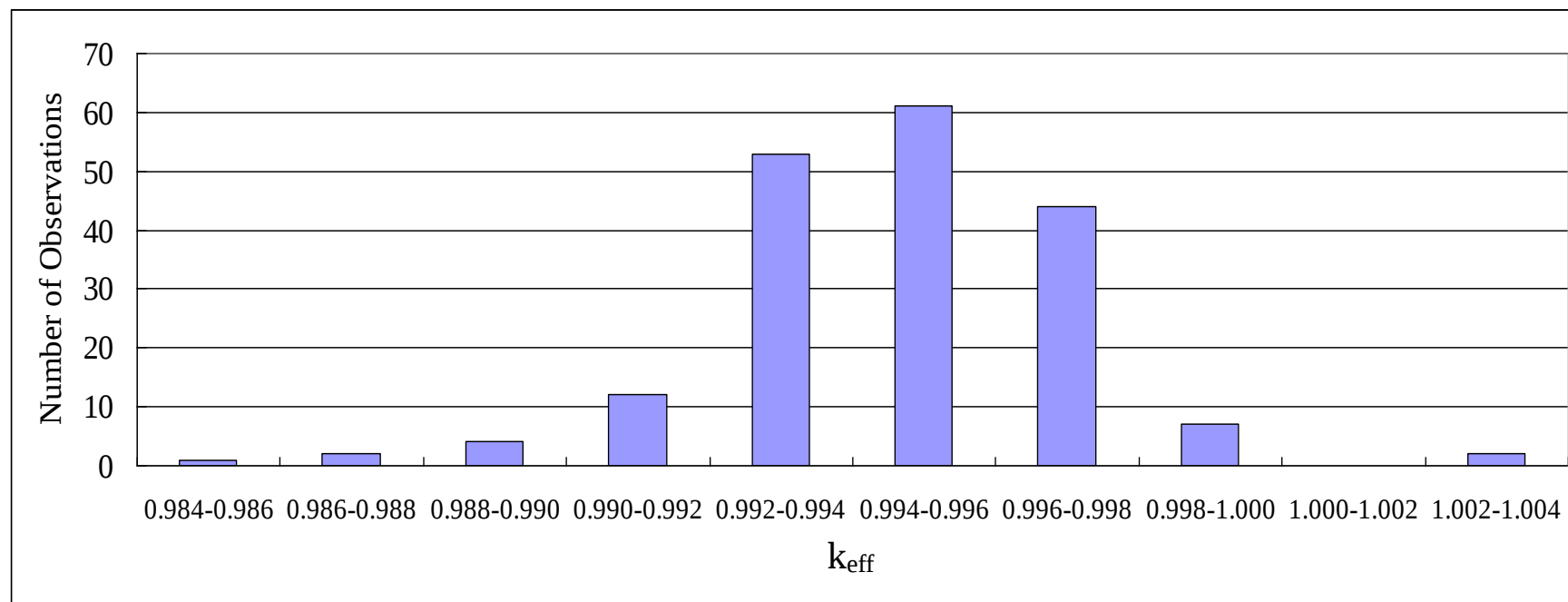


圖 6.1.4 1 驗證計算所得 k_{eff} 值分佈圖

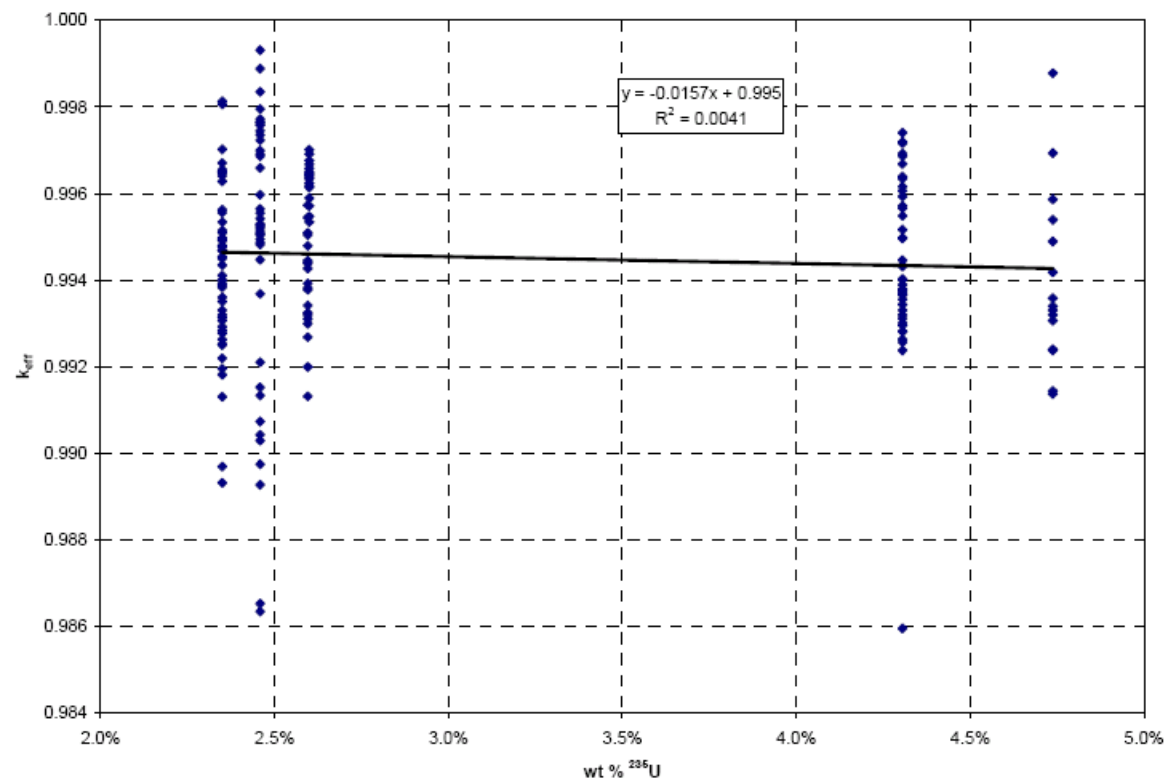


圖 6.1.4-2 驗證計算所得 k_{eff} 值對濃縮度之散佈圖

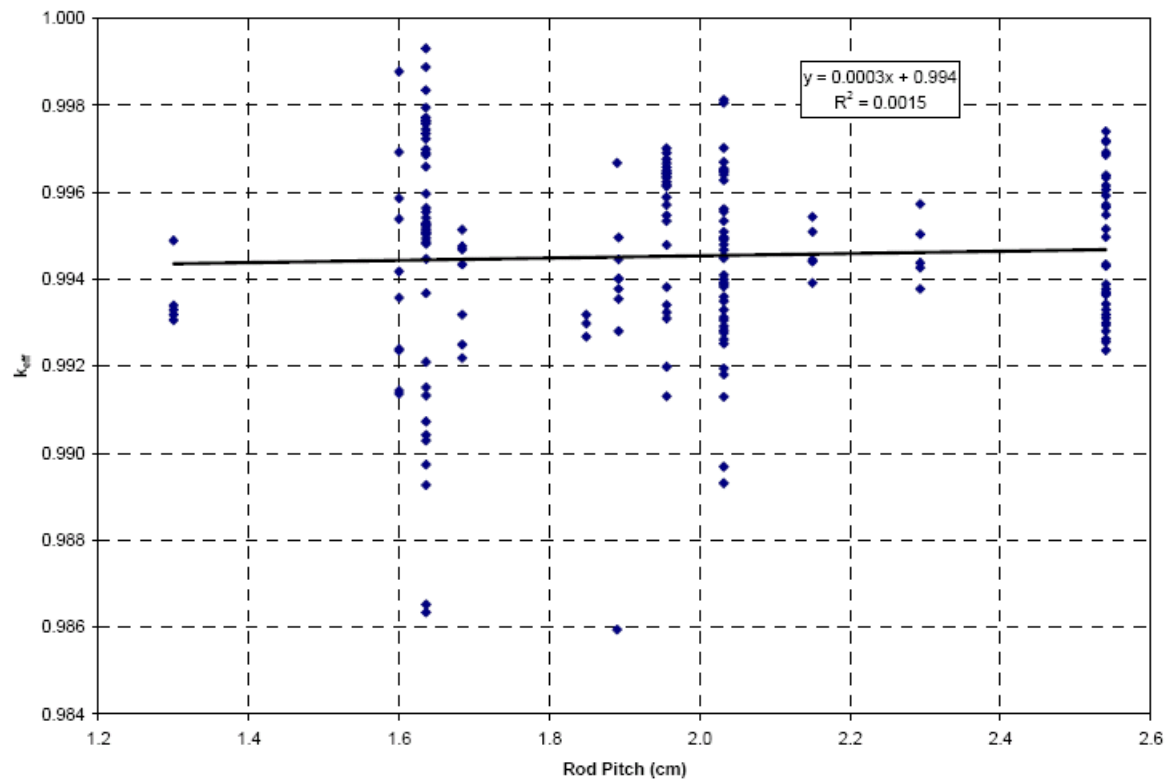


圖 6.1.4-3 驗證計算所得 k_{eff} 值對燃料棒間距之散佈圖

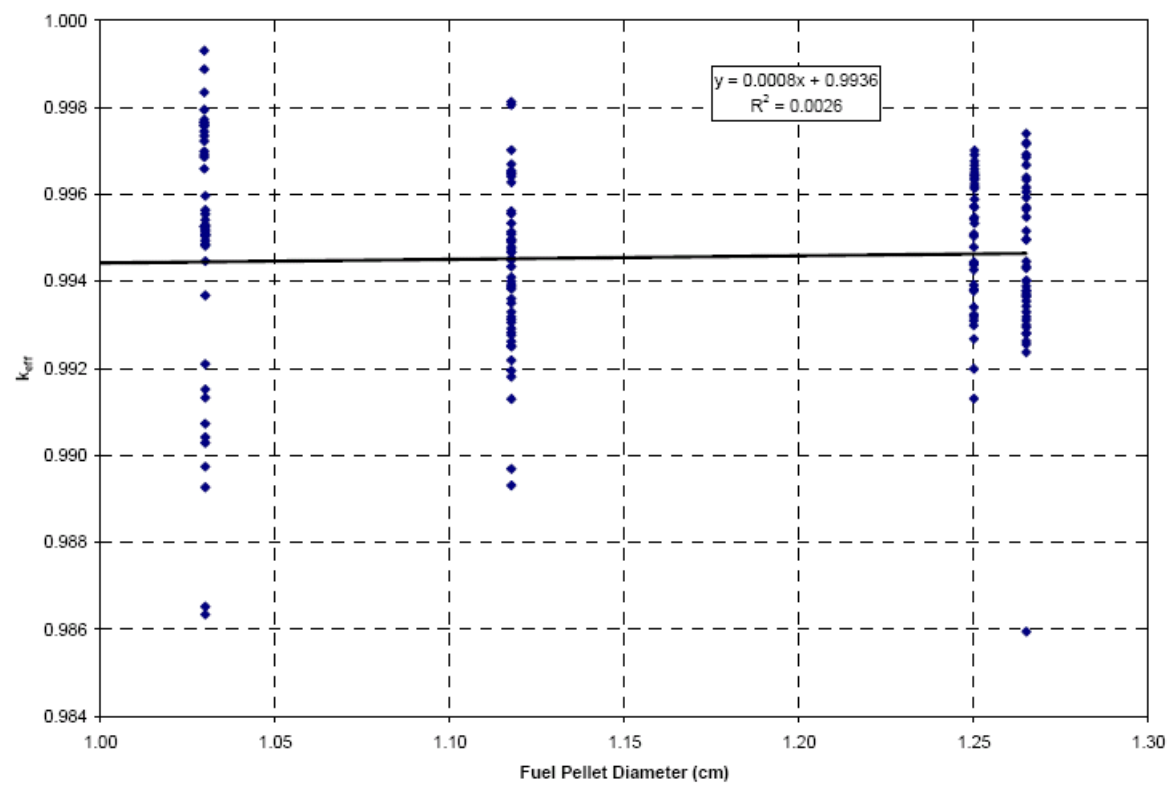


圖 6.1.4-4 驗證計算所得 k_{eff} 值對燃料丸直徑之散佈圖

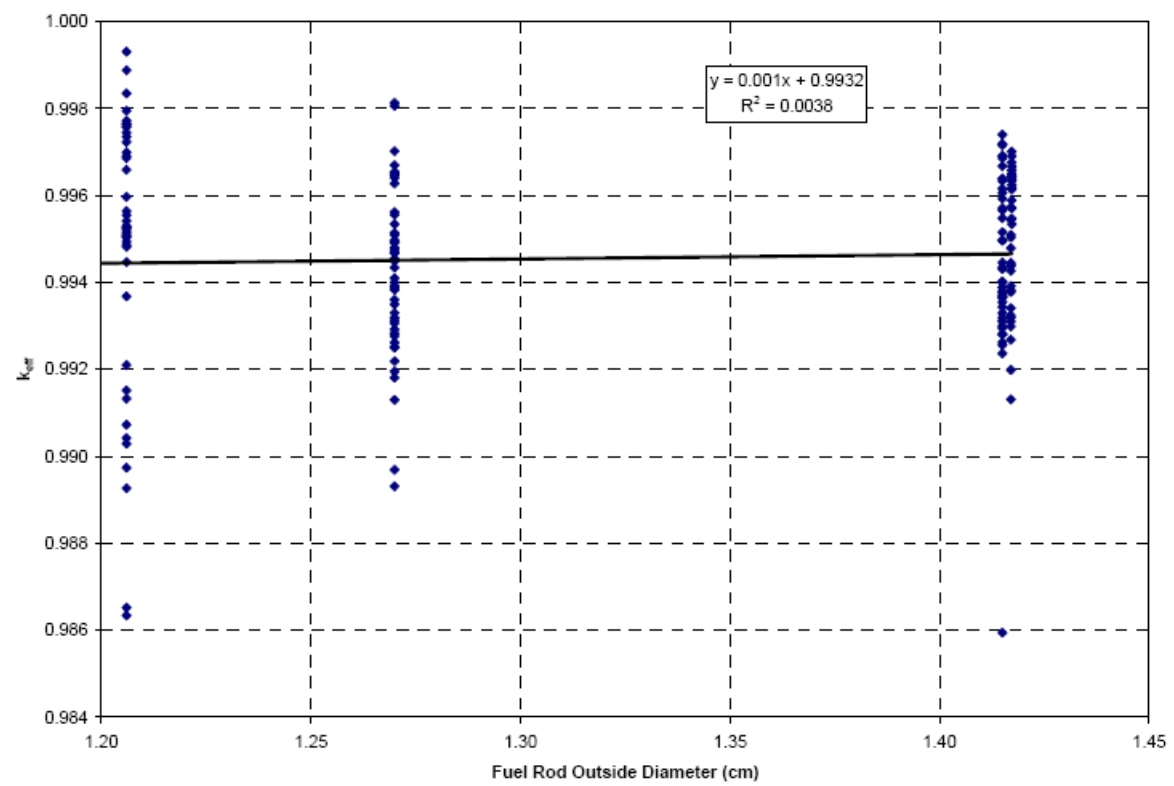


圖 6.1.4-5 驗證計算所得 k_{eff} 值對燃料棒外徑之散佈圖

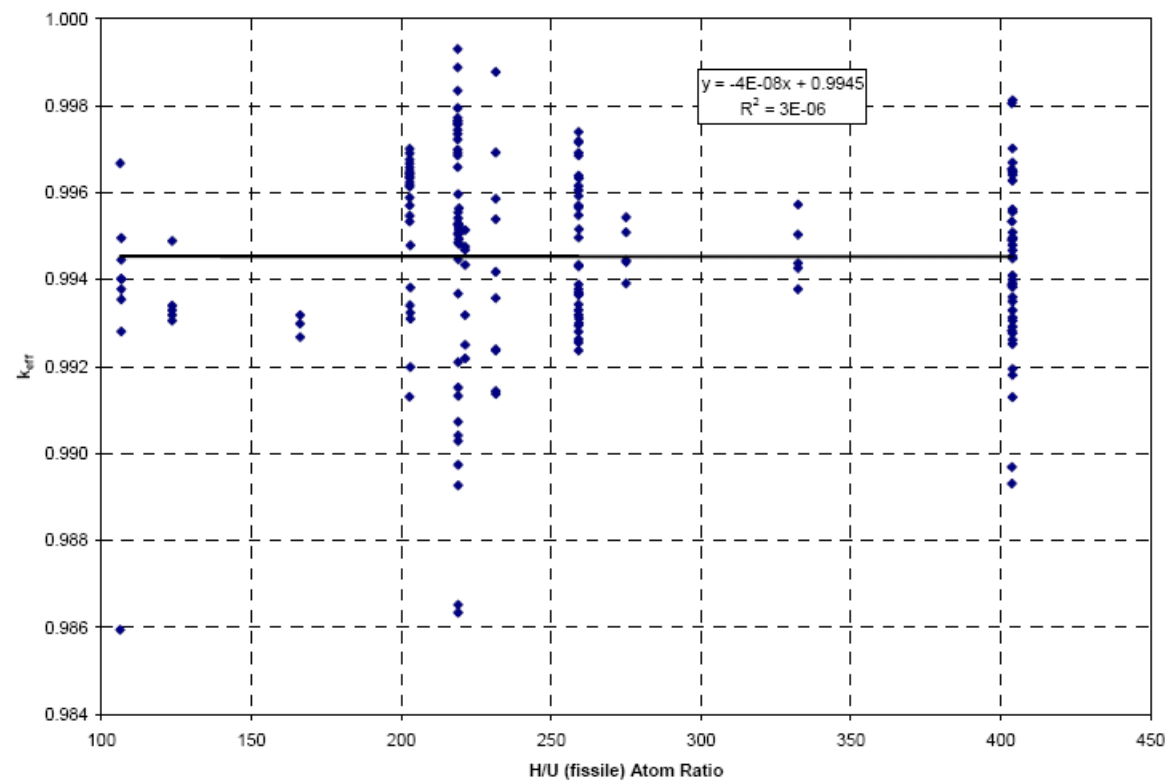


圖 6.1.4-6 驗證計算所得 k_{eff} 值對水鈾原子數比(H/U) 之散佈圖

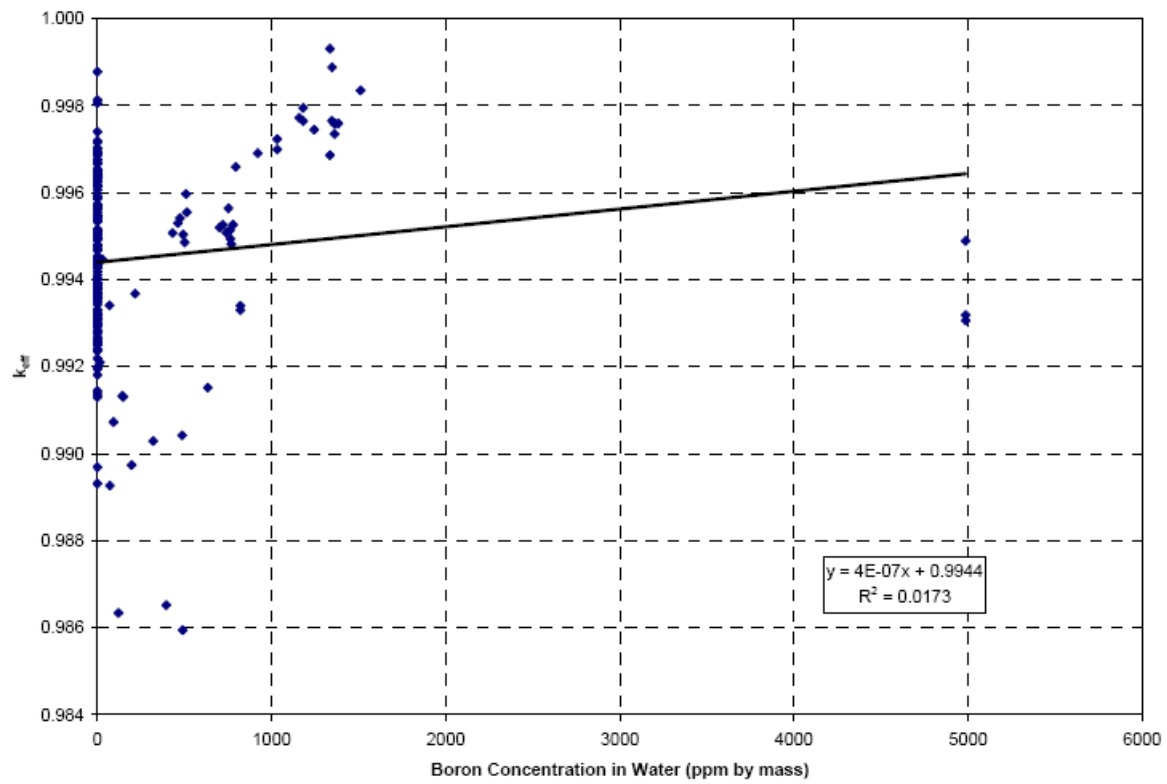


圖 6.1.4-7 驗證計算所得 k_{eff} 值對硼酸濃度之散佈圖

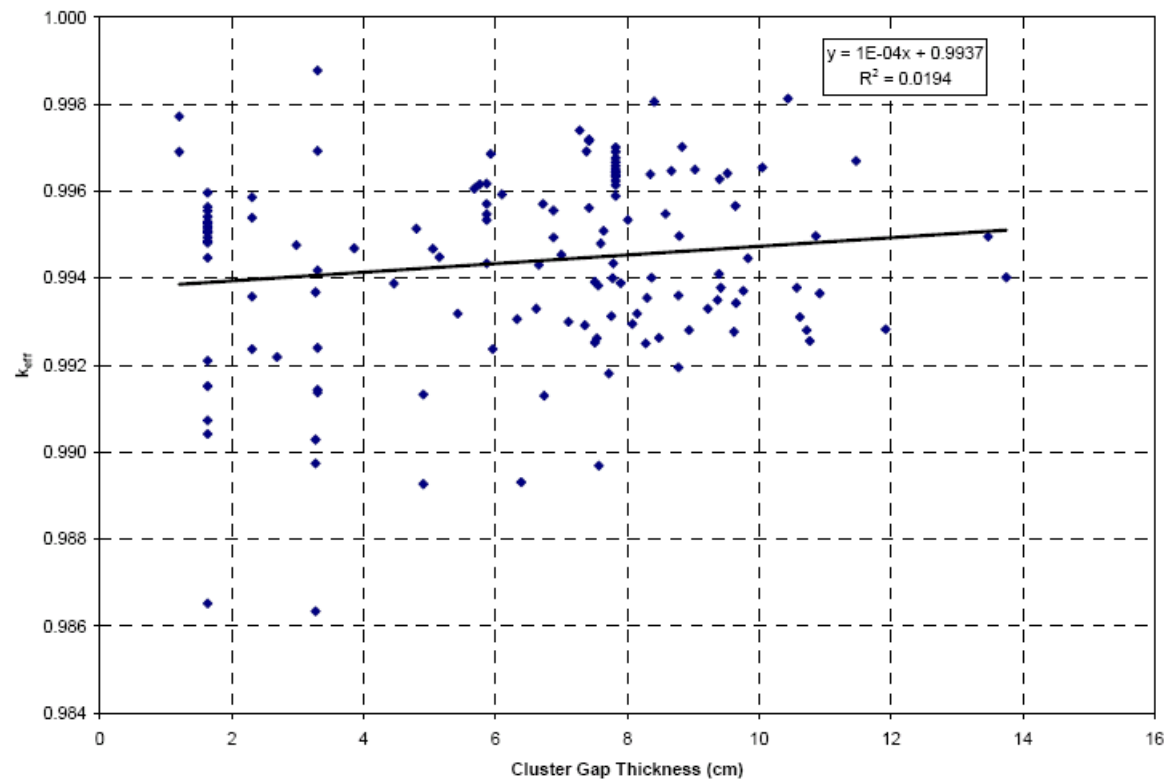


圖 6.1.4-8 驗證計算所得 k_{eff} 值對叢集間距之散佈圖

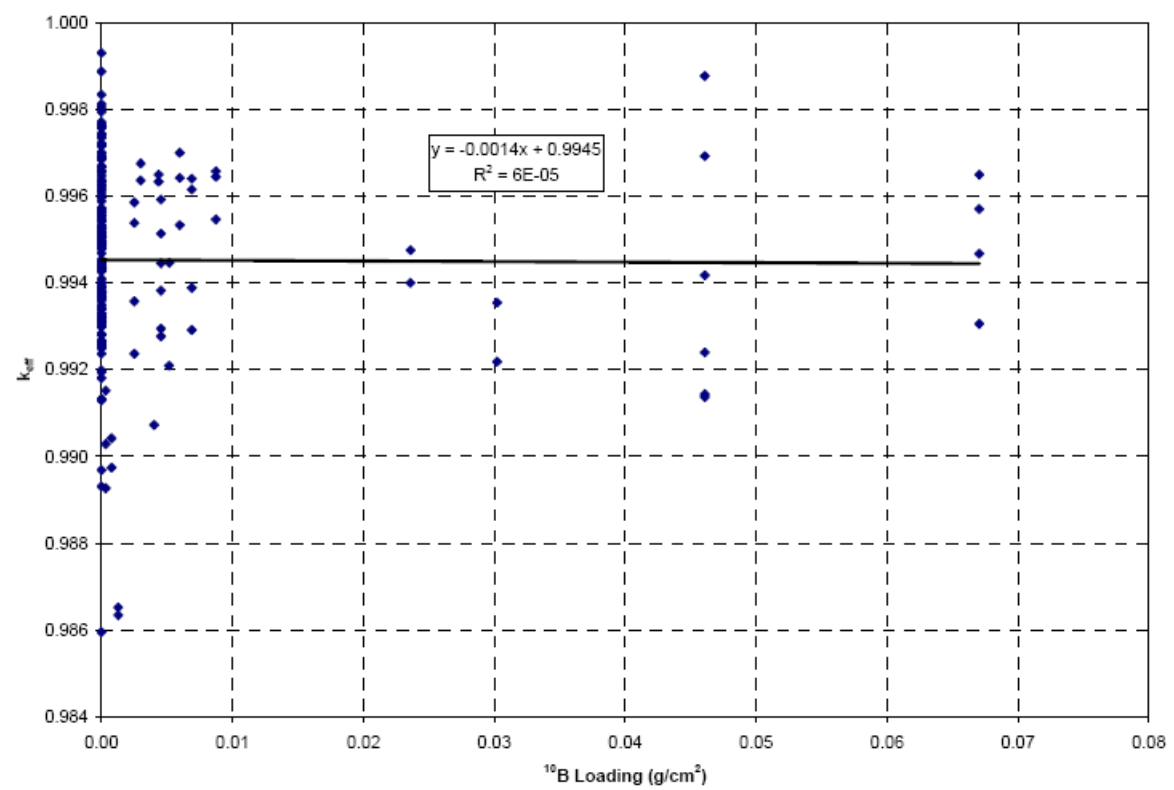


圖 6.1.4-9 驗證計算所得 k_{eff} 值對硼片 ^{10}B 含量之散佈圖

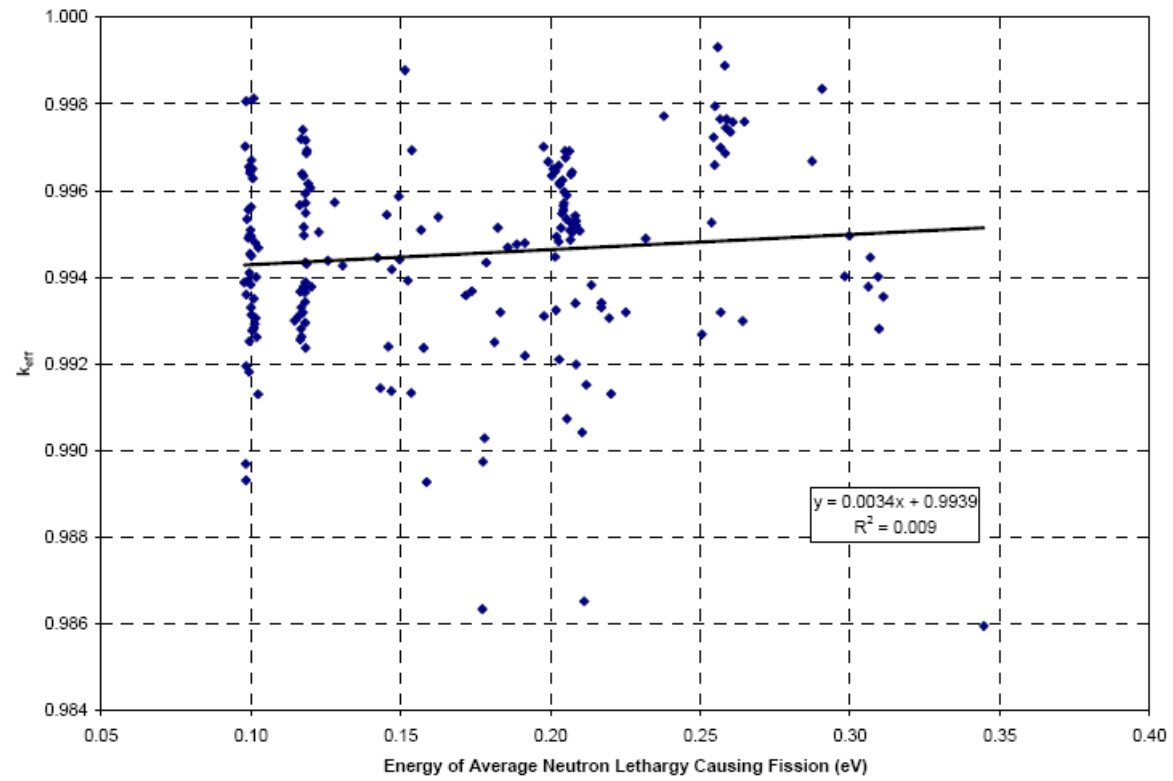


圖 6.1.4-10 驗證計算所得 k_{eff} 值對 EALCF 之散佈圖

表 6.1.4-1 186 個臨界驗證實驗參數涵蓋範圍

參數	最小值	最大值
濃縮度 (wt % ^{235}U)	2.350%	4.738%
燃料棒間距 (cm)	1.30	2.54
燃料丸外徑 (cm)	0.790	1.265
燃料棒外徑 (cm)	0.9400	1.4172
水鈾比 ($\text{H}/^{235}\text{U}$)	72.7	403.9
硼酸濃度 (ppm)	0	4986
叢集間距 (cm)	1.206	13.750
硼片 ^{10}B 含量 (g/cm^2)	0.0000	0.0670
EALCF (eV)	0.09781	0.77219

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽

實驗編號	1.01	1.02	1.03	1.04	1.05	1.06	1.07	1.08
叢集數	1	3	3	3	3	3	3	3
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%
燃料棒間距(cm)	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032
燃料棒外徑 (cm)	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118
護套外徑 (cm)	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	404	404	404	404	404	404	404	404
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式	-	-	-	-	-	-	-	-
叢集間距 (cm)	-	11.9	8.4	10.1	6.4	8.0	4.5	7.6
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	-	-	-	-	-	-	-	-
EALCF (MeV)	9.916E-8	1.010E-7	9.838E-8	9.933E-8	9.837E-8	9.874E-8	9.781E-8	9.826E-8
實驗不準度 σ	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0031	0.0030
MCNP5	k_{eff}	0.99491	0.99283	0.99806	0.99655	0.98931	0.99534	0.99388
	σ	0.00165	0.00155	0.00155	0.00165	0.00169	0.00162	0.00152

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號		2.01	2.02	2.03	2.04	2.05
叢集數		1	1	1	3	3
濃縮度(wt % ²³⁵ U)		4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%
燃料棒間距(cm)		2.540	2.540	2.540	2.540	2.540
燃料棒外徑 (cm)		1.265	1.265	1.265	1.265	1.265
護套外徑 (cm)		1.415	1.415	1.415	1.415	1.415
護套材料		Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)		259	259	259	259	259
硼酸濃度 (ppm)		-	-	-	-	-
中子吸收板型式		-	-	-	-	-
叢集間距 (cm)		-	-	-	10.6	7.1
反射體材料		H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)		-	-	-	-	-
EALCF (MeV)		1.177E-7	1.164E-7	1.175E-7	1.161E-7	1.146E-7
實驗不準度 σ		0.0020	0.0020	0.0020	0.0018	0.0019
MCNP5	k_{eff}	0.99516	0.99367	0.99634	0.99311	0.99300
	σ	0.00195	0.00157	0.00190	0.00193	0.00161

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號		6.01	6.02	6.03	6.04	6.05	6.06	6.07	6.08	6.09
叢集數		1	1	1	1	1	1	1	1	1
濃縮度(wt % ²³⁵ U)		2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%
燃料棒間距(cm)		1.849	1.849	1.849	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956	2.150
燃料棒外徑 (cm)		1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
護套外徑 (cm)		1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417
護套材料		Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)		166	166	166	203	203	203	203	203	275
硼酸濃度 (ppm)		-	-	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式		-	-	-	-	-	-	-	-	-
叢集間距 (cm)		-	-	-	-	-	-	-	-	-
反射體材料		H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)		-	-	-	-	-	-	-	-	-
EALCF (MeV)		2.506E-7	2.568E-7	2.642E-7	1.915E-7	1.978E-7	2.018E-7	2.085E-7	2.136E-7	1.422E-7
實驗不準度 σ		0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020
MCNP5	k _{eff}	0.99268	0.99319	0.99299	0.99479	0.99310	0.99324	0.99199	0.99382	0.99445
	σ	0.00065	0.00076	0.00074	0.00074	0.00069	0.00070	0.00071	0.00071	0.00069

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	6.10	6.11	6.12	6.13	6.14	6.15	6.16	6.17	6.18
叢集數	1	1	1	1	1	1	1	1	1
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%
燃料棒間距(cm)	2.150	2.150	2.150	2.150	2.293	2.293	2.293	2.293	2.293
燃料棒外徑 (cm)	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
護套外徑 (cm)	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	275	275	275	275	332	332	332	332	332
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式	-	-	-	-	-	-	-	-	-
叢集間距 (cm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EALCF (MeV)	1.453E-7	1.496E-7	1.523E-7	1.568E-7	1.202E-7	1.227E-7	1.257E-7	1.280E-7	1.306E-7
實驗不準度 σ	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020	0.0020
MCNP5	k_{eff}	0.99544	0.99441	0.99392	0.99509	0.99378	0.99504	0.99438	0.99573
	σ	0.00073	0.00071	0.00078	0.00076	0.00070	0.00075	0.00067	0.00070

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號		8.01	8.02	8.03	8.04	8.05	8.06	8.07	8.08
叢集數		3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3
濃縮度(wt % ²³⁵ U)		2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%
燃料棒間距(cm)		1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636
燃料棒外徑 (cm)		1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030
護套外徑 (cm)		1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206
護套材料		Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈷比 (可裂材料)		219	219	219	219	219	219	219	219
硼酸濃度 (ppm)		1511	1336	1336	1182	1182	1033	1033	794
中子吸收板型式		-	-	-	-	-	-	-	-
叢集間距 (cm)		-	-	-	-	-	-	-	-
反射體材料		H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)		-	-	-	-	-	-	-	-
EALCF (MeV)		2.907E-7	2.583E-7	2.559E-7	2.548E-7	2.566E-7	2.568E-7	2.544E-7	2.548E-7
實驗不準度 σ		0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
MCNP5	k _{eff}	0.99835	0.99686	0.99931	0.99795	0.99765	0.99699	0.99723	0.99659
	σ	0.00060	0.00063	0.00032	0.00063	0.00069	0.00061	0.00066	0.00073

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	8.09	8.10	8.11	8.12	8.13	8.14	8.15	8.16	8.17
叢集數	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3	5	5 x 5
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%
燃料棒間距(cm)	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636
燃料棒外徑 (cm)	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030
護套外徑 (cm)	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	219	219	219	219	219	219	219	219	219
硼酸濃度 (ppm)	779	1245	1384	1348	1348	1363	1363	1158	921
中子吸收板型式	-	-	-	-	-	-	-	-	-
叢集間距 (cm)	-	-	-	-	-	-	-	1.2	1.2
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
EALCF (MeV)	2.538E-7	2.586E-7	2.647E-7	2.587E-7	2.582E-7	2.600E-7	2.609E-7	2.379E-7	2.063E-7
實驗不準度 σ	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012	0.0012
MCNP5	k_{eff}	0.99526	0.99745	0.99759	0.99765	0.99888	0.99735	0.99758	0.99772
	σ	0.00072	0.00065	0.00068	0.00065	0.00070	0.00067	0.00071	0.00062

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	9.01	9.02	9.03	9.04	9.05	9.06	9.07	9.08	9.09	9.10	9.11	9.12	9.13	
叢集數	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	
燃料棒間距(cm)	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	
燃料棒外徑 (cm)	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	
護套外徑 (cm)	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	
水鈾比 (可裂材料)	259	259	259	259	259	259	259	259	259	259	259	259	259	
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
中子吸收板型式	304L SS (no B)	304L SS (no B)	304L SS (no B)	304L SS (no B)	304L SS (1.05% B)	304L SS (1.05% B)	304L SS (1.62% B)	304L SS (1.62% B)	Boral	Cu	Cu	Cu	Cu	
叢集間距 (cm)	8.6	9.7	9.2	9.8	6.1	8.1	5.8	7.9	6.7	8.2	9.4	8.5	9.6	
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00455	0.00455	0.00690	0.00690	0.06704	-	-	-	-	
EALCF (MeV)	1.183E-7	1.181E-7	1.168E-7	1.179E-7	1.182E-7	1.182E-7	1.191E-7	1.182E-7	1.183E-7	1.173E-7	1.176E-7	1.169E-7	1.163E-7	
實驗不準度 σ	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	
MCNP5	k _{eff}	0.99548	0.99343	0.99330	0.99371	0.99593	0.99295	0.99616	0.99389	0.99571	0.99319	0.99378	0.99263	0.99566
	σ	0.00191	0.00182	0.00187	0.00192	0.00174	0.00193	0.00198	0.00175	0.00209	0.00153	0.00178	0.00191	0.00177

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	9.14	9.15	9.16	9.17	9.18	9.19	9.20	9.21	9.22	9.23	9.24	9.25	9.26	9.27	
叢集數	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	
燃料棒間距(cm)	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	2.540	
燃料棒外徑 (cm)	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	
護套外徑 (cm)	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	
水鈾比 (可裂材料)	259	259	259	259	259	259	259	259	259	259	259	259	259	259	
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
中子吸收板型式	Cu (0.989 wt % Cd)	Cu (0.989 wt % Cd)	Cd	Cd	Cd	Cd	Cd	Cd	Cd	Cd	Al (no B)	Al (no B)	Zircaloy-4	Zircaloy-4	
叢集間距 (cm)	6.7	8.4	5.9	7.4	6.0	7.4	5.9	7.4	5.7	7.3	10.7	10.8	10.9	10.9	
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00000	0.00000	-	-	
EALCF (MeV)	1.186E-7	1.171E-7	1.186E-7	1.183E-7	1.183E-7	1.168E-7	1.182E-7	1.187E-7	1.199E-7	1.173E-7	1.167E-7	1.165E-7	1.181E-7	1.177E-7	
實驗不準度 σ	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	0.0021	
MCNP5	k _{eff}	0.99431	0.99639	0.99686	0.99716	0.99237	0.99719	0.99434	0.99692	0.99606	0.99740	0.99281	0.99256	0.99365	0.99497
	σ	0.00188	0.00207	0.00183	0.00166	0.00194	0.00187	0.00179	0.00183	0.00189	0.00206	0.00168	0.00197	0.00197	0.00193

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	11.03	11.04	11.05	11.06	11.07	11.08	11.09
叢集數	3	3	3	3	3	3	3
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%
燃料棒間距(cm)	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636
燃料棒外徑 (cm)	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030
護套外徑 (cm)	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	219	219	219	219	219	219	219
硼酸濃度 (ppm)	769	764	762	753	739	721	702
中子吸收板型式	-	-	-	-	-	-	-
叢集間距 (cm)	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	-	-	-	-	-	-	-
EALCF (MeV)	2.027E-7	2.020E-7	2.035E-7	2.044E-7	2.065E-7	2.068E-7	2.085E-7
實驗不準度 σ	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032	0.0032
MCNP5	k _{eff}	0.99482	0.99494	0.99514	0.99564	0.99508	0.99526
	σ	0.00031	0.00030	0.00030	0.00030	0.00031	0.00031

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	13.01	13.02	13.03	13.04	13.05	13.06	13.07
叢集數	3	3	3	3	3	3	3
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%
燃料棒間距(cm)	1.892	1.892	1.892	1.892	1.892	1.892	1.892
燃料棒外徑 (cm)	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265	1.265
護套外徑 (cm)	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415	1.415
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	107	107	107	107	107	107	107
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式	304L SS (no B)	304L SS (1.05% B)	Boral B	Boroflex	Cd	Cu	Cu (0.989 wt % Cd)
叢集間距 (cm)	13.8	9.8	8.3	8.4	8.9	13.5	10.6
反射體材料	Steel	Steel	Steel	Steel	Steel	Steel	Steel
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	0.00000	0.00455	0.03022	0.02361	-	-	-
EALCF (MeV)	2.982E-7	3.068E-7	3.111E-7	3.094E-7	3.097E-7	2.998E-7	3.061E-7
實驗不準度 σ	0.0018	0.0018	0.0018	0.0018	0.0032	0.0018	0.0018
MCNP5	k_{eff}	0.99402	0.99446	0.99355	0.99401	0.99281	0.99496
	σ	0.00068	0.00064	0.00064	0.00064	0.00066	0.00063

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號		14.01	14.02	14.05	14.06	14.07
叢集數		1	1	1	1	1
濃縮度(wt % ²³⁵ U)		4.31%	4.31%	4.31%	4.31%	4.31%
燃料棒間距(cm)		1.890	1.890	1.890	1.715	1.715
燃料棒外徑 (cm)		1.265	1.265	1.265	1.265	1.265
護套外徑 (cm)		1.415	1.415	1.415	1.415	1.415
護套材料		Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)		106	106	106	73	73
硼酸濃度 (ppm)		0	491	2539	0	1030
中子吸收板型式		-	-	-	-	-
叢集間距 (cm)		-	-	-	-	-
反射體材料		H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)		-	-	-	-	-
EALCF (MeV)		2.873E-7	3.447E-7	6.003E-7	5.175E-7	7.722E-7
實驗不準度 σ		0.0019	0.0077	0.0069	0.0033	0.0051
MCNP5	k _{eff}	0.99668	0.98595	1.00221	1.00245	0.99973
	σ	0.00044	0.00045	0.00043	0.00045	0.00044

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	16.01	16.02	16.03	16.04	16.05	16.06	16.07	16.08	16.09	16.10
叢集數	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%
燃料棒間距(cm)	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032
燃料棒外徑 (cm)	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118
護套外徑 (cm)	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	404	404	404	404	404	404	404	404	404	404
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式	304L SS (no B)	304L SS (no B)	304L SS (no B)	304L SS (no B)	304L SS (no B)	304L SS (no B)	304L SS (no B)	304L SS (1.05% B)	304L SS (1.05% B)	304L SS (1.62% B)
叢集間距 (cm)	6.9	7.6	7.5	7.4	7.8	10.4	11.5	7.6	9.6	7.4
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00455	0.00455	0.00690
EALCF (MeV)	1.000E-7	9.983E-8	9.947E-8	1.001E-7	1.002E-7	1.009E-7	1.001E-7	9.993E-8	1.004E-7	1.012E-7
實驗不準度 σ	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031
MCNP5	k _{eff}	0.99494	0.99509	0.99252	0.99562	0.99313	0.99813	0.99670	0.99383	0.99277
	σ	0.00171	0.00153	0.00157	0.00162	0.00173	0.00179	0.00175	0.00172	0.00162

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	16.11	16.12	16.13	16.14	16.15	16.16	16.17	16.18	16.19	16.20	16.21	16.22	
叢集數	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	
燃料棒間距(cm)	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	
燃料棒外徑 (cm)	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	
護套外徑 (cm)	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	
水鈷比 (可裂材料)	404	404	404	404	404	404	404	404	404	404	404	404	
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
中子吸收板型式	304L SS (1.62% B)	Boral	Boral	Boral	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu	Cu (0.989 wt % Cd)	Cd	Cd	
叢集間距 (cm)	9.5	6.3	9.0	5.1	6.6	7.7	7.5	6.9	7.0	5.2	6.7	7.6	
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	0.00690	0.06704	0.06704	0.06704	-	-	-	-	-	-	-	-	
EALCF (MeV)	9.962E-8	1.016E-7	1.006E-7	1.025E-7	1.000E-7	9.944E-8	9.904E-8	9.919E-8	9.971E-8	1.001E-7	1.024E-7	1.014E-7	
實驗不準度 σ	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	
MCNP5	k _{eff}	0.99641	0.99306	0.99650	0.99468	0.99330	0.99181	0.99392	0.99556	0.99454	0.99449	0.99130	0.99480
	σ	0.00154	0.00161	0.00152	0.00162	0.00157	0.00153	0.00155	0.00172	0.00165	0.00155	0.00166	0.00157

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	16.23	16.24	16.25	16.26	16.27	16.28	16.29	16.30	16.31	16.32
叢集數	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%
燃料棒間距(cm)	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032	2.032
燃料棒外徑 (cm)	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118
護套外徑 (cm)	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	404	404	404	404	404	404	404	404	404	404
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式	Cd	Cd	Cd	Cd	Cd	Al (no B)	Al (no B)	Al (no B)	Zircaloy-4	Zircaloy-4
叢集間距 (cm)	9.4	7.8	9.4	7.5	9.4	8.7	8.8	8.8	8.8	8.8
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	-	-	-	-	-	0.00000	0.00000	0.00000	-	-
EALCF (MeV)	1.010E-7	1.018E-7	1.006E-7	1.019E-7	9.948E-8	9.991E-8	9.843E-8	9.807E-8	9.964E-8	9.834E-8
實驗不準度 σ	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031	0.0031
MCNP5	k_{eff}	0.99350	0.99400	0.99628	0.99262	0.99410	0.99647	0.99360	0.99702	0.99497
	σ	0.00184	0.00152	0.00169	0.00151	0.00168	0.00166	0.00157	0.00160	0.00163

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號		35.01	35.02	40.01	40.02	40.03	40.04	40.05	40.06	40.07	40.08	40.09	40.10
叢集數		1	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
濃縮度(wt % ²³⁵ U)		2.60%	2.60%	4.74%	4.74%	4.74%	4.74%	4.74%	4.74%	4.74%	4.74%	4.74%	4.74%
燃料棒間距(cm)		1.956	1.956	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600	1.600
燃料棒外徑 (cm)		1.250	1.250	0.790	0.790	0.790	0.790	0.790	0.790	0.790	0.790	0.790	0.790
護套外徑 (cm)		1.417	1.417	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940	0.940
護套材料		Al	Al	Al alloy	Al alloy	Al alloy	Al alloy	Al alloy	Al alloy	Al alloy	Al alloy	Al alloy	Al alloy
水鈾比 (可裂材料)		203	203	231	231	231	231	231	231	231	231	231	231
硼酸濃度 (ppm)		70	148	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式		-	-	Z2 CN18/10 SS (1.10% B)	Z2 CN18/10 SS (1.10% B)	Z2 CN18/10 SS (1.10% B)	Z2 CN18/10 SS (1.10% B)	Boral	Boral	Boral	Boral	Boral	Boral
叢集間距 (cm)		-	-	2.3	2.3	2.3	2.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3	3.3
反射體材料		H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	Lead	Lead	Lead	H ₂ O	Lead	Lead	Lead	Steel	Steel
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)		-	-	0.00252	0.00252	0.00252	0.00252	0.04608	0.04608	0.04608	0.04608	0.04608	0.04608
EALCF (MeV)		2.170E-7	2.202E-7	1.493E-7	1.717E-7	1.625E-7	1.576E-7	1.432E-7	1.515E-7	1.470E-7	1.459E-7	1.537E-7	1.469E-7
實驗不準度 σ		0.0018	0.0019	0.0039	0.0041	0.0041	0.0041	0.0042	0.0044	0.0044	0.0044	0.0046	0.0046
MCNP5	k _{eff}	0.99341	0.99131	0.99586	0.99358	0.99539	0.99237	0.99144	0.99878	0.99418	0.99240	0.99693	0.99137
	σ	0.00070	0.00078	0.00195	0.00192	0.00203	0.00194	0.00193	0.00196	0.00224	0.00216	0.00190	0.00208

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	42.01	42.02	42.03	42.04	42.05	42.06	42.07
叢集數	3	3	3	3	3	3	3
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%	2.35%
燃料棒間距(cm)	1.684	1.684	1.684	1.684	1.684	1.684	1.684
燃料棒外徑 (cm)	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118	1.118
護套外徑 (cm)	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270	1.270
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	221	221	221	221	221	221	221
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式	304L SS (no B)	304L SS (1.05% B)	Boral B	Boroflex	Cd	Cu	Cu-Cd
叢集間距 (cm)	8.3	4.8	2.7	3.0	3.9	7.8	5.4
反射體材料	Steel	Steel	Steel	Steel	Steel	Steel	Steel
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	0.00000	0.00455	0.03022	0.02361	-	-	-
EALCF (MeV)	1.813E-7	1.824E-7	1.915E-7	1.887E-7	1.857E-7	1.786E-7	1.833E-7
實驗不準度 σ	0.0016	0.0016	0.0016	0.0017	0.0033	0.0016	0.0018
MCNP5	k_{eff}	0.99250	0.99514	0.99219	0.99476	0.99469	0.99434
	σ	0.00171	0.00183	0.00169	0.00169	0.00161	0.00191

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號		50.03	50.04	50.05	50.06	50.06
叢集數		1	1	1	1	1
濃縮度(wt % ²³⁵ U)		4.74%	4.74%	4.74%	4.74%	4.74%
燃料棒間距(cm)		1.300	1.300	1.300	1.300	1.300
燃料棒外徑 (cm)		0.790	0.790	0.790	0.790	0.790
護套外徑 (cm)		0.940	0.940	0.940	0.940	0.940
護套材料		Al alloy	Al alloy	Al alloy	Al alloy	Al alloy
水鈷比 (可裂材料)		124	124	124	124	124
硼酸濃度 (ppm)		821	821	4986	4986	4986
中子吸收板型式		-	-	-	-	-
叢集間距 (cm)		-	-	-	-	-
反射體材料		Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)		-	-	-	-	-
EALCF (MeV)		2.170E-7	2.083E-7	2.318E-7	2.252E-7	2.195E-7
實驗不準度 σ		0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
MCNP5	k_{eff}	0.99330	0.99340	0.99489	0.99319	0.99306
	σ	0.00080	0.00071	0.00075	0.00075	0.00080

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	51.01	51.02	51.03	51.04	51.05	51.06	51.07	51.08	51.09
叢集數	9	9	9	9	9	9	9	9	9
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%
燃料棒間距(cm)	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636
燃料棒外徑 (cm)	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030
護套外徑 (cm)	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	219	219	219	219	219	219	219	219	219
硼酸濃度 (ppm)	143	510	514	501	493	474	462	432	217
中子吸收板型式	none	SS	SS	SS	SS	SS	SS	SS	SS
叢集間距 (cm)	4.9	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	3.3
反射體材料	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	0.00000	-	-	-	-	-	-	-	-
EALCF (MeV)	1.535E-7	2.045E-7	2.043E-7	2.067E-7	2.074E-7	2.083E-7	2.085E-7	2.098E-7	1.737E-7
實驗不準度 σ	0.0020	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0024	0.0019
MCNP5	k_{eff}	0.99133	0.99597	0.99555	0.99486	0.99504	0.99542	0.99530	0.99507
	σ	0.00033	0.00035	0.00033	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00033

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	51.10	51.11	51.12	51.13	51.14	51.15	51.16	51.17	51.18	51.19
叢集數	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%	2.46%
燃料棒間距(cm)	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636	1.636
燃料棒外徑 (cm)	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030	1.030
護套外徑 (cm)	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206	1.206
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	219	219	219	219	219	219	219	219	219	219
硼酸濃度 (ppm)	15	28	92	395	121	487	197	634	320	72
中子吸收板型式	B/Al Set 5	B/Al Set 5A	B/Al Set 4	B/Al Set 3	B/Al Set 3	B/Al Set 2	B/Al Set 2	B/Al Set 1	B/Al Set 1	B/Al Set 1
叢集間距 (cm)	1.6	1.6	1.6	1.6	3.3	1.6	3.3	1.6	3.3	4.9
反射體材料	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O	Borated H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	0.00517	0.00519	0.00403	0.00128	0.00128	0.00078	0.00078	0.00032	0.00032	0.00032
EALCF (MeV)	2.029E-7	2.015E-7	2.056E-7	2.112E-7	1.773E-7	2.106E-7	1.775E-7	2.119E-7	1.780E-7	1.587E-7
實驗不準度 σ	0.0019	0.0019	0.0019	0.0022	0.0019	0.0024	0.0020	0.0027	0.0021	0.0019
MCNP5	k _{eff}	0.99210	0.99447	0.99073	0.98652	0.98634	0.99042	0.98974	0.99152	0.99029
	σ	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00034	0.00035

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	65.01	65.02	65.03	65.04	65.05	65.06	65.07	65.08
叢集數	2	2	2	2	2	2	2	2
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%
燃料棒間距(cm)	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956
燃料棒外徑 (cm)	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
護套外徑 (cm)	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	203	203	203	203	203	203	203	203
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式	none	304L SS (No B)	304L SS (0.67% B)	304L SS (0.98% B)	none	304L SS (No B)	304L SS (No B)	304L SS (No B)
叢集間距 (cm)	5.9	5.9	5.9	5.9	7.8	7.8	7.8	7.8
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	-	0.00000	0.00599	0.00875	-	0.00000	0.00000	0.00000
EALCF (MeV)	2.045E-7	2.030E-7	2.054E-7	2.038E-7	2.049E-7	2.030E-7	2.055E-7	2.040E-7
實驗不準度 σ	0.0014	0.0014	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014	0.0014	0.0016
MCNP5	k _{eff}	0.99571	0.99618	0.99534	0.99547	0.99691	0.99614	0.99589
	σ	0.00023	0.00022	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023	0.00023

表 6.1.4-2 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽(續)

實驗編號	65.09	65.10	65.11	65.12	65.13	65.14	65.15	65.16	65.17
叢集數	2	2	2	2	2	2	2	2	2
濃縮度(wt % ²³⁵ U)	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%
燃料棒間距(cm)	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956	1.956
燃料棒外徑 (cm)	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
護套外徑 (cm)	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417	1.417
護套材料	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al	Al
水鈾比 (可裂材料)	203	203	203	203	203	203	203	203	203
硼酸濃度 (ppm)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
中子吸收板型式	304L SS (No B)	304L SS (0.67% B)	304L SS (0.67% B)	304L SS (0.67% B)	304L SS (0.67% B)	304L SS (0.98% B)	304L SS (0.98% B)	304L SS (0.98% B)	304L SS (0.98% B)
叢集間距 (cm)	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8	7.8
反射體材料	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O	H ₂ O
硼片含量 (g ¹⁰ B /cm ²)	0.00000	0.00299	0.00299	0.00599	0.00599	0.00438	0.00438	0.00875	0.00875
EALCF (MeV)	1.993E-7	2.050E-7	2.069E-7	2.072E-7	1.977E-7	2.010E-7	2.004E-7	2.027E-7	2.017E-7
實驗不準度 σ	0.0015	0.0016	0.0016	0.0017	0.0016	0.0016	0.0016	0.0017	0.0016
MCNP5	k_{eff}	0.99667	0.99676	0.99637	0.99643	0.99701	0.99650	0.99634	0.99658
	σ	0.00022	0.00022	0.00023	0.00023	0.00022	0.00023	0.00023	0.00022

表 6.1.4-3 臨界實驗驗證的相關係數與 USL(對應 186 個臨界實驗)

參數	R ²	R	適用範圍	USLSTATS		
				USL Limit	USL Low	USL High
濃縮度 (wt % ²³⁵ U)	0.00001	0.003	2.35<=X<=4.738	0.9384+9.16E-06X	0.9384	0.9384
燃料棒間距 (cm)	0.00010	0.010	1.3<=X<=2.54	0.9383+8.04E-05X	0.9384	0.9385
燃料丸外徑 (cm)	0.00840	0.092	0.79<=X<=1.265	0.9366+1.60E-03X	0.9378	0.9386
燃料棒外徑 (cm)	0.00970	0.098	0.94<=X<=1.4172	0.9361+1.73E-03X	0.9377	0.9385
水鈾比 (H/ ²³⁵ U)	0.00870	0.093	72.7<=X<=403.9	0.9391-2.52E-06X	0.9380	0.9389
硼酸濃度 (ppm)	0.02990	0.173	0<=X<=4986	0.9377+5.62E-07X	0.9377	0.9405
叢集間距 (cm)	0.01940	0.139	1.2<=X<=13.8	0.9375+9.82E-05X	0.9376	0.9388
硼片 ¹⁰ B 含量 (g/cm ²)	0.00050	0.022	0<=X<=0.067	0.9381-4.23E-03X	0.9378	0.9381
EALCF (eV)	0.09090	0.301	0.09781<=X<=0.7722	0.9364+8.44E-03X	0.9372	0.9429

表 6.1.4-4 臨界實驗驗證的相關係數與 USL(去掉 3 個最高的 EALCF 實驗)

參數	R ²	R	適用範圍	USLSTATS		
				USL Limit	USL Low	USL High
濃縮度 (wt % ²³⁵ U)	0.00410	0.064	2.35<=X<=4.738	0.9390+-1.57E-04X	0.9382	0.9386
燃料棒間距 (cm)	0.00150	0.039	1.3<=X<=2.54	0.9380+2.64E-04X	0.9383	0.9386
燃料丸外徑 (cm)	0.00260	0.051	0.79<=X<=1.265	0.9376+8.25E-04X	0.9382	0.9386
燃料棒外徑 (cm)	0.00380	0.062	0.94<=X<=1.4172	0.9372+1.01E-03X	0.9381	0.9386
水鈾比 (H/ ²³⁵ U)	3.00E-06	0.002	106.2<=X<=403.9	0.9386-4.74E-08X	0.9385	0.9385
硼酸濃度 (ppm)	0.01730	0.132	0<=X<=4986	0.9379+3.96E-07X	0.9379	0.9398
叢集間距 (cm)	0.01940	0.139	1.2<=X<=13.8	0.9375+9.82E-05X	0.9376	0.9388
硼片 ¹⁰ B 含量 (g/cm ²)	0.00006	0.008	0<=X<=0.067	0.9382-1.37E-03X	0.9381	0.9382
EALCF (eV)	0.00900	0.095	0.09781<=X<=0.3447	0.9379+3.45E-03X	0.9382	0.9390

(五) 分析結果

本報告所評估的護箱為本系統之傳送護箱與混凝土護箱，所評估的核子燃料，為核二廠的用過核子燃料 GE8x8-2 及 ANF8x8-2 兩種燃料型式。

在整個分析過程中，無論是計算機程式模式的建立，及系統參數的設定，其基本的邏輯是極限涵蓋分析法；如此，可以滿足法規對於要儘可能保守的要求，同時又能簡化問題的複雜度。以下說明臨界評估各項分析的計算結果。

1. 決定設計基準燃料

MAGNASTOR 系統原有分析包括 7x7、8x8、9x9 和 10x10 等燃料型式，其中代號 B8_62A 這一燃料型式，和本計畫之待貯存核子燃料，同屬 8x8 列陣、62 根燃料棒和 2 根水棒的設計，表 6.1.2-1 為 GE8x8-2、ANF8x8-2 與 B8_62A 的燃料設計參數比較表。

由於護箱貯存系統是處於緩和和不足的情況下，因此提高水鈾比及提高燃料含量將會提高系統反應度。只要證明 B8_62A 燃料型式的各項燃料設計參數可涵蓋 GE8x8-2 與 ANF8x8-2 的燃料設計參數，根據極限涵蓋分析法可判斷 B8_62A 在核反應度上可涵蓋此兩種待貯存燃料，即可以 B8_62A 代表本案待貯存燃料做為設計基準燃料進行臨界分析。

燃料束的各項設計參數中，燃料束結構相關聯的部分與系統反應度無關，因此僅比較有效燃料區域的參數，如表 6.1.5-1。由該表可知，B8_62A 的燃料棒間距、燃料丸直徑、燃料棒外徑、燃料護套厚度、有效燃料長度與水棒護套厚度可以涵蓋 GE8x8-2 及 ANF8x8-2；ANF8x8-2 的水棒外直徑較 B8_62A 小 2.72 mm，本節(五).4 會針對此差異分析，結果顯示對反應度沒有顯著影響；而 B8_62A 的燃料密度及濃縮度 (10.52 g/cm^3 & $3.3 \text{ wt}\% \text{ }^{235}\text{U}$)則高於 GE8x8-2 (10.32 g/cm^3 & $3.03 \text{ wt}\% \text{ }^{235}\text{U}$)及 ANF8x8-2 (10.36 g/cm^3 & $3.25 \text{ wt}\% \text{ }^{235}\text{U}$)。由上可知，B8_62A 可完全涵蓋 GE8x8-2 與 ANF8x8-2 兩種燃料束。

在燃料幾何尺寸上，B8_62A 都可涵蓋 GE8x8-2 與 ANF8x8-2 或不會導致顯著的反應度變化的前提下，燃料密度及 U-235 濃縮度對於反應度具有絕對

的影響力，因此燃料密度及濃縮度較高的 B8_62A 其反應度可以涵蓋 GE8x8-2 及 ANF8x8-2 的反應度。

以下分析均以 B8_62A 做為設計基準燃料，除特別說明外，燃料濃縮度皆為 3.3 wt% ^{235}U ，中子吸收板 ^{10}B 有效面密度為 0.020 g/cm^2 。

2. 護套間隙注滿水對反應度的影響

一般沸水式反應器的燃料束在提籃中是處於緩和不足(under-moderate)的情況，因此最高水鈾比的燃料幾何設置理論上應有最高的反應度。在設計基準燃料的幾何尺寸參數範圍內以最高水鈾比及最大燃料丸直徑的設置做為初始設置，來進行護套間隙注滿水與燃料匣厚度的分析。最高水鈾比及最大燃料丸直徑的初始設置如下：

- 最小燃料棒外徑
- 最小燃料護套厚度
- 最大燃料棒間距
- 最小水棒外徑及厚度
- 最大燃料丸直徑

分析時提籃結構的設置為燃料束位於燃料方管的正中央位置。表 6.1.5-2 為傳送護箱護套間隙注水情形對反應度影響的計算結果，結果顯示護套間隙注滿水較乾的護套間隙反應度較高，此結果顯示系統是處於緩和不足。

正常狀況下具完整性燃料之護套是不會發生破損的，因此接下來的各項分析均設定護套間隙為乾的，只有在最後一項允許最大濃縮度的分析項目中才假定燃料護套間隙注滿水。

3. 燃料匣厚度變化對反應度的影響

因 BWR 燃料束的設計上可將燃料匣拆除再放置到儲存系統中，因此分別分析燃料匣厚度為 3.048 mm (120 mil)、2.032 mm (80 mil) 及沒有燃料匣對於反應度的影響。表 6.1.5-3 為傳送護箱燃料匣厚度對反應度影響的計算結果，結果顯示 3.048 mm (120 mil) 厚度的燃料匣反應度最高，可涵蓋不含燃料匣的燃料束。核二廠 GE8x8-2 及 ANF8x8-2 所使用的燃料匣厚度為 3.048 mm (120 mil)，將會連同燃料匣一同貯存。

4. 燃料束各組件幾何尺寸製造公差對反應度的影響

護套間隙注滿水對反應度的影響評估結果已初步證明系統是處在緩和不足的情況。為了更進一步驗證系統是處於緩和不足的情況下，本分析特別將設計基準燃料的數項幾何尺寸參數範圍之最大值及最小值再加上製造公差，以期能再提高水鈾比，使反應度再提高。

表 6.1.5-4 為傳送護箱燃料束組件幾何尺寸對反應度影響的計算結果，結果顯示以本章一、(五).2 節最高水鈾比的設置反應度會最大，此結果進一步驗證了系統是處於緩和不足。待貯存燃料 ANF8x8-2 的水棒直徑及厚度與設計基準燃料 B8-62A 略有不同，因此特將表 6.1.5-4 案例 2 的水棒尺寸改成 ANF8x8-2 的水棒尺寸，結果顯示反應度由 0.90950 變成 0.91063， $\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$ 僅有 1.1，因此可知水棒尺寸對於反應度不具統計意義的影響。

由於燃料束各組件的製造公差是獨立且不互相影響的，單一項製造公差的變化不足以造成具統計意義的反應度變化，因此可忽略製造公差對反應度的影響。如結合各製造公差的最大反應度設置，則可能會有具統計意義的影響，此將在本節(五).10 討論。

5. 燃料束均勻化與非均勻化濃縮度分佈對反應度的影響

由於 BWR 的燃料束其濃縮度分佈在軸向與徑向並不是均勻的，為了更保守並減輕在後續計算時模擬各個不同濃縮度分佈的困擾，前述各項分析均假定使用均勻濃縮度。此小節使用 B8_62A 並參考真實的 GE8x8-2 的晶格佈局設計，將其燃料棒的濃縮度等比例調整達到 3.3 wt% ^{235}U 的面平均濃縮度，比較均勻濃縮度分佈及實際濃縮度分佈的反應度。

表 6.1.5-5 為傳送護箱濃縮度均勻分佈與非均勻分佈對反應度影響的計算結果，結果顯示，使用初始軸向最高面平均濃縮度會比使用真實濃縮度分佈的燃料束更保守。

6. 密封鋼筒內部與外部水密度變化對反應度的影響

本分析假定在護箱外圍表面往外 20 公分設置圓柱形反射邊界，護箱表面至反射邊界的空間可填充水以檢視護箱外部水密度變化對護箱反應度的影響，燃料濃縮度為 3.3 wt%，中子吸收板 ^{10}B 有效密度為 0.020 g/cm²，燃料護

套間隙注滿水。圖 6.1.5-1 為傳送護箱密封鋼筒內外水密度變化對反應度影響的計算結果。密封鋼筒內部水密度變化從 0 至 0.9982 g/cm^3 時，外部水密度維持不變；同樣結果顯示反應度隨密封鋼筒內部水密度的增大而變大，外部水密度的變化則對反應度沒有太大的影響。

水面淹至有效燃料區上端分析是針對傳送護箱在排水時，造成有效燃料區上端原本之水反射體換成上蓋的鋼材反射體可能造成的反應度變化。表 6.1.5-6 為傳送護箱部份水淹蓋對反應度影響的計算結果，結果顯示密封鋼筒內部注滿水與淹蓋至有效燃料上端對反應度沒有具統計意義的影響。

7. 提籃結構幾何尺寸製造公差與燃料束機械性偏移對反應度的影響

要考慮的變數包括：

- (1). 燃料方管開口的尺寸變化，燃料方管的厚度製造公差為 $\pm 0.762 \text{ mm}$ 。
- (2). 中子吸收板的尺寸變化，厚度的製造公差為 $\pm 0.1524 \text{ mm}$ ，寬度的製造公差為 $\pm 2.032 \text{ mm}$ 。
- (3). 燃料束（含燃料匣）在燃料方管內的移動：移動方向有徑向朝內、徑向朝外。

第(1)~(2)項為評估燃料方管與中子吸收板的製造公差對反應度的影響，第(3)項為評估燃料束在燃料方管內移動對反應度的影響，圖 6.1.5-2 為此兩種移動方向的示意圖。

在評估中子吸收板製造公差對反應度的影響時，假定中子吸收板的 ^{10}B 有效面積密度不隨之改變，其主要原因是中子吸收板製造廠家會保證其產品之 ^{10}B 面積密度，在此製造公差範圍內，均能符合客戶要求的最小 ^{10}B 面積密度。

表 6.1.5-7 為提籃結構製造公差與燃料束移動對反應度影響 (獨立變數) 的計算結果，分別評估最大或最小製造公差設置以及燃料束在燃料方管內移動對反應度影響，結果顯示製造公差對反應度的影響除了最大的燃料方管厚度設置使反應度有些微的增加以外，其他的製造公差對反應度沒有具統計意義的影響；燃料束徑向朝內移動的設置有些微增加系統反應度。表 6.1.5-8 為提籃結構製造公差與燃料束移動對反應度影響(合併變數)的計算結果，評估合併

最大或最小製造公差設置以及燃料束在燃料方管內移動對反應度影響，以找出反應度最大的提籃設置/幾何組態方式。

其結論為最大反應度的提籃設置/幾何組態方式如下：

- 最小燃料方管寬度及對角線長度
- 最大燃料方管厚度
- 最小中子吸收板寬度及最大中子吸收板厚度
- 燃料束徑向朝內移動

8. 傳送護箱最大反應度與可容許最高濃縮度

本節結合各種可能使反應度增大的設置，逐步調整燃料濃縮度以找出護箱系統 $k_{eff}+2\sigma$ 小於 USL 的最大濃縮度，模型設置如下：

- 燃料與護套間隙注滿水
- 最大水鈾比的燃料束設置/幾何組態與最大燃料丸直徑
- 濃縮度以初始軸向最高面平均濃縮度均勻分佈
- 密封鋼筒內注滿水，外部沒有水
- 提籃以最大反應度的製造公差設置與燃料束徑向朝內移動
- 最少中子吸收板數目及以雙排鉚接釘替代單排鉚接釘。

表 6.1.5-9 為傳送護箱最大允許濃縮度與反應度的計算結果，該表列出了中子吸收板 ^{10}B 有效面積密度分別為 0.027、0.0225 和 0.02 g/cm^2 所對應的最大允許濃縮度，分別為 3.8、3.6 和 3.5 wt% ^{235}U 。

9. 護箱在正常狀況、異常事件與意外事故的臨界分析

傳送護箱和混凝土護箱的正常狀況、異常事件與意外事故定義，顯示如下；

狀況 條件	傳送護箱				混凝土護箱		
	正常/異常 狀況		意外事故		正常 狀況	異常 事件	意外 事故
密封鋼筒外部	乾	溼	溼	乾	乾	溼	溼

密封鋼筒內部	乾	溼	溼	溼	乾	乾	溼
護套間隙*	乾	乾	溼	溼	乾	乾	溼

*護套間隙溼的代表注滿密度為 0.9982 g/cm^3 的水

傳送護箱在裝填燃料階段，密封鋼筒是在有水的環境下進行，因此正常情況下密封鋼筒內和外乾濕皆可，但護套間隙為乾的；在事故情況下假設護套間隙內注滿水。密封鋼筒完成封焊之後，在物理上沒有任何會使水滲入到密封鋼筒的可能性，惟為了進一步確保系統臨界安全，另分析了混凝土護箱密封鋼筒內部是濕的情況。

設計基準燃料的濃縮度為 $3.3 \text{ wt}\% \text{ }^{235}\text{U}$ ，結合初始（反應度最大的）燃料束設置/幾何組態、反應度最大的提籃設置/幾何組態，中子吸收板 ^{10}B 有效面積密度使用 0.020 g/cm^2 ，在這些條件下，以展示本系統貯存 GE8x8-2 及 ANF8x8-2 核子燃料（最高濃縮度為 $3.25 \text{ wt}\% \text{ }^{235}\text{U}$ ）時，系統具有額外的安全餘裕。

表 6.1.5-10 為正常狀況、異常事件與意外事故下傳送護箱與混凝土護箱臨界分析的計算結果，由該表可知，傳送護箱於正常狀況下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 最大值為 0.91793；於意外事故下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 最大值為 0.92246。混凝土護箱於正常狀況下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 為 0.36019；於異常事件下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 為 0.36174；於意外事故下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 為 0.92199。以上結果均小於 USL 0.9372。亦即，在提籃內部設置為反應度最強的設置方式下，包括程式偏差值與所有不準度，傳送護箱和混凝土護箱兩者均能滿足法規對於 k_{eff} 值要小於 0.95 的規定。

10. 合併燃料束幾何尺寸公差對反應度的影響

如結合燃料束各幾何尺寸製造公差的最大反應度設置，可能會有具統計意義的反應度上升，因此需計算合併燃料束製造公差對反應度的影響，製造公差的項目有：燃料棒晶格間距($\pm 0.00254 \text{ cm}$)、燃料棒外徑($\pm 0.00254 \text{ cm}$)、燃料護套厚度($\pm 0.00762 \text{ cm}$)、燃料丸直徑($\pm 0.00191 \text{ cm}$)、有效燃料長度($\pm 0.635 \text{ cm}$)。

以傳送護箱分析，計算使用的燃料濃縮度為 $3.3 \text{ wt}\%$ ，中子吸收板 ^{10}B 有效面積密度為 0.020 g/cm^2 ，並以本節(五).2 至(五).8 所討論的各項會造成反應

度上升的項目設置。將製造公差逐項以最大值及最小值設置的計算結果列於表 6.1.5-11，結果顯示較多的燃料及緩和劑的設置會使反應度上升，沒有任何單獨的製造公差變化會造成超過 2σ 的反應度上升，此結果可支持本節(五).4 忽略燃料束製造公差的假設。表 6.1.5-12 列出合併各項反應度最大的燃料束製造公差，傳送護箱的 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 為 0.92516，與未考慮製造公差的反應度相差 2.55σ ，因此可判斷即使結合各項使反應度上升的製造公差設置也不會有具統計意義的反應度上升，即使加計此反應度上升尚與 USL 還有充足的餘裕。

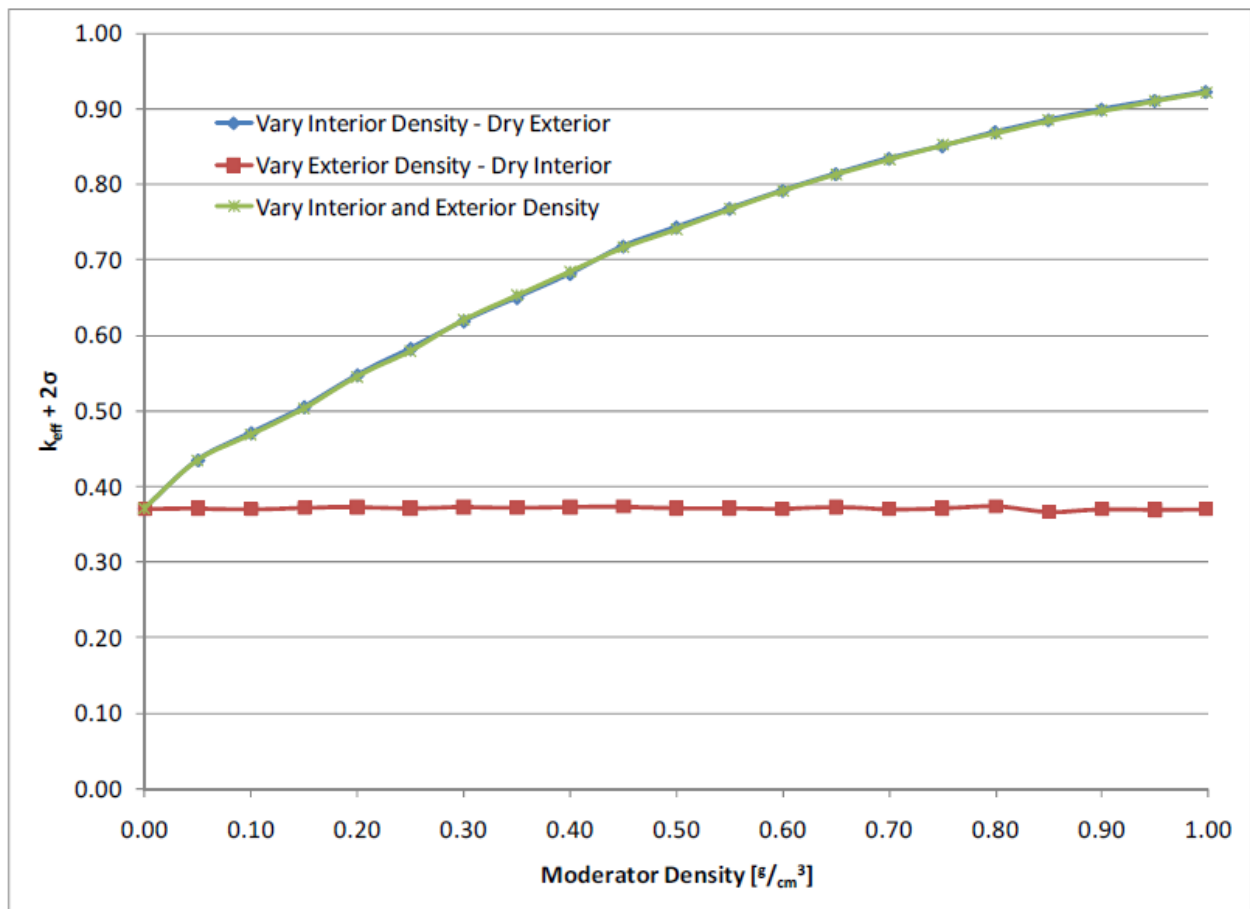


圖 6.1.5-1 密封鋼筒內外水密度變化對反應度影響

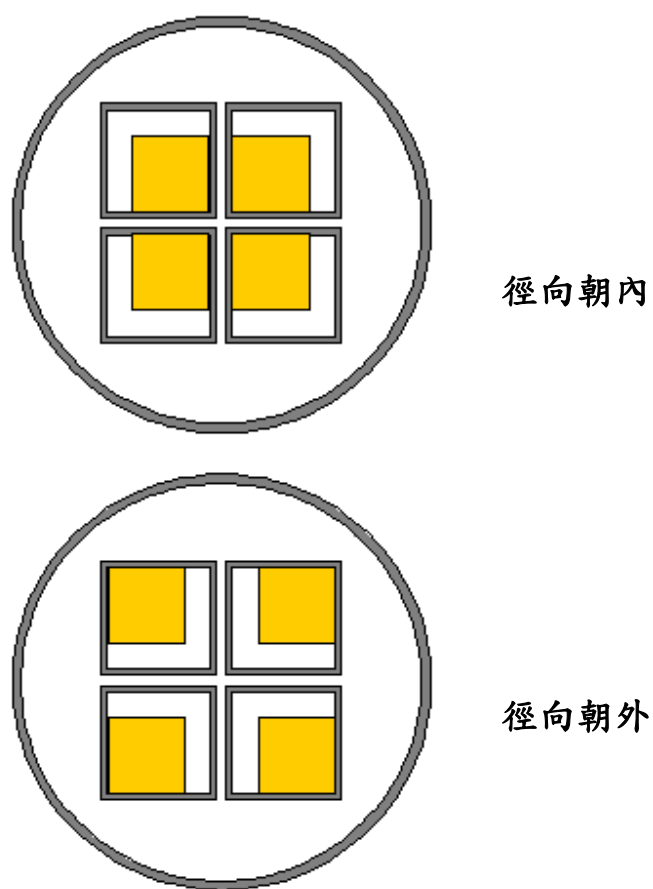


圖 6.1.5-2 燃料束在燃料方管內機械性偏移方向示意圖

表 6.1.5-1 GE8x8-2、ANF8x8-2 與 B8_62A 燃料設計參數比較

燃料棒參數	B8_62A	GE8x8-2	是否 涵蓋	ANF8x8-2	是否 涵蓋
燃料棒間距(mm)	16.299	16.154	是	16.154	是
燃料丸直徑(mm)	10.566	10.414	是	10.30	是
燃料棒外徑(mm)	12.268	12.268	是	12.29	是
燃料護套厚度(mm)	0.7366	0.813	是	0.89	是
有效燃料長度(mm)	3810.0	3810	是	3810	是
燃料束參數	B8_62A	GE8x8-2	是否 涵蓋	ANF8x8-2	是否 涵蓋
軸向最高面平均濃縮 度 (wt % U-235)	最小 3.3	3.03	是	3.25	是
有效堆疊密度 (g/cm ³)	10.52	10.32	是	10.36	是
最大裝填鈾重(MTU)	0.1921	0.183	是	0.176	是
燃料棒數目	62	62	是	62	是
水棒數	2	2	是	2	是
水棒外徑(mm)	15.01	15.01	是	12.29	無影 響
水棒護套厚度(mm)	0.762	0.762	是	0.89	是
燃料匣厚度(mm)	3.048	3.048	是	3.048	是

表 6.1.5-2 護套間隙注水情形對反應度的影響

燃料型式	護套間隙乾的 k_{eff}	護套間隙注滿水 k_{eff}	$\Delta k_{eff}/\sigma$
B8_62A	0.90827	0.91266	4.1

表 6.1.5-3 燃料匣厚度對反應度的影響

燃料型式	3.048 mm (120 mil) k_{eff}	2.032 mm (80 mil) k_{eff}	No Channel k_{eff}	No Channel — 3.048 mm (120 mil) $\Delta k_{eff}/\sigma$
B8_62A	0.90827	0.90371	0.90327	-4.8

表 6.1.5-4 燃料束組件幾何尺寸對反應度的影響

	2	1	3	4	5	6	7	8
燃料棒水鈾比	Max	Max	Max	Max	Min	Min	Min	Min
燃料丸直徑	Max	Max	Min	Min	Max	Max	Min	Min
水棒厚度及外徑	Min	Max	Max	Min	Max	Min	Max	Min
B8_62A	0.90950	0.90890	0.89863	0.89961	0.90306	0.90274	0.89295	0.89350
		Case 2	Case 2	Case 2	Case 2	Case 2	Case 2	Case 2
		To	To	To	To	To	To	To
		Case 1	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
		$\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$	$\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$	$\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$	$\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$	$\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$	$\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$	$\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$
B8_62A		-0.6	-10.3	-9.7	-6.2	-6.5	-15.7	-15.3

表 6.1.5-5 濃縮度均勻分佈與非均勻分佈對反應度的影響

燃料型式	平均濃縮度 (wt % ²³⁵ U)	燃料丸最大濃縮度 (wt % ²³⁵ U)	濃縮度分佈	k _{eff}	Δ k _{eff} / σ
B8_62A	3.3	3.3	均勻	0.90827	--
B8_62A	3.3	4.44	非均勻	0.89543	-12.2

表 6.1.5-6 部份水淹蓋對反應度的影響

燃料型式	護套間隙乾的		$\Delta k_{eff}/\sigma$
	密封鋼筒內部注	密封鋼筒內部注水	
	滿水 k_{eff}	至有效燃料上端 k_{eff}	
B8_62A	0.90827	0.90562	-2.5

表 6.1.5-7 提籃結構製造公差與燃料束移動對反應度的影響 (獨立變數)

燃料方管			中子吸收板		燃料束偏移	B8_62A	
外寬	厚度	對角線	寬度	厚度	方向	k_{eff}	$\Delta k_{eff}/\sigma$
Nom	Nom	Nom	Nom	Nom	維持中央	0.91266	--
Nom	Nom	Nom	Min	Nom	維持中央	0.91339	0.7
Nom	Nom	Nom	Max	Nom	維持中央	0.91144	-1.2
Nom	Nom	Nom	Nom	Min	維持中央	0.91370	1.0
Nom	Nom	Nom	Nom	Max	維持中央	0.91132	-1.3
Min	Nom	Nom	Nom	Nom	維持中央	0.91493	2.2
Max	Nom	Nom	Nom	Nom	維持中央	0.91240	-0.2
Nom	Min	Nom	Nom	Nom	維持中央	0.91057	-2.0
Nom	Max	Nom	Nom	Nom	維持中央	0.91537	2.5
Nom	Nom	Min	Nom	Nom	維持中央	0.91295	0.3
Nom	Nom	Max	Nom	Nom	維持中央	0.91054	-2.0
Nom	Nom	Nom	Nom	Nom	徑向朝內	0.91782	4.8
Nom	Nom	Nom	Nom	Nom	徑向朝外	0.90236	-9.9

表 6.1.5-8 提籃結構製造公差與燃料束移動對反應度的影響(合併變數)

燃料方管			中子吸收板		燃料束偏移	B8_62A	
外寬	厚度	對角線	寬度	外寬	方向	k _{eff}	Δk _{eff} /σ
Nom	Nom	Nom	Nom	Nom	徑向朝內	0.91782	--
Min	Nom	Nom	Nom	Nom	徑向朝內	0.91537	-2.3
Max	Nom	Nom	Nom	Nom	徑向朝內	0.91700	-0.8
Nom	Min	Nom	Nom	Nom	徑向朝內	0.91601	-1.7
Nom	Max	Nom	Nom	Nom	徑向朝內	0.91992	2.0
Nom	Nom	Min	Nom	Nom	徑向朝內	0.91550	-2.1
Nom	Nom	Max	Nom	Nom	徑向朝內	0.91545	-2.3
Nom	Nom	Nom	Min	Nom	徑向朝內	0.91894	1.0
Nom	Nom	Nom	Max	Nom	徑向朝內	0.91559	-2.1
Nom	Nom	Nom	Nom	Min	徑向朝內	0.91652	-1.2
Nom	Nom	Nom	Nom	Max	徑向朝內	0.91664	-1.1
Min	Min	Min	Min	Min	徑向朝內	0.91632	-1.4
Min	Nom	Min	Min	Nom	徑向朝內	0.91784	0.0
Max	Nom	Min	Min	Nom	徑向朝內	0.91866	0.8
Nom	Nom	Min	Min	Nom	徑向朝內	0.91895	1.0
Nom	Max	Nom	Nom	Max	徑向朝內	0.91878	0.9
Min	Max	Min	Min	Max	徑向朝內	0.92096	2.9

表 6.1.5-9 傳送護箱最大允許濃縮度與反應度

燃料型式	^{10}B 有效面積密度			
	$0.027\ ^{10}\text{B g/cm}^2$		$0.0225\ ^{10}\text{B g/cm}^2$	$0.02\ ^{10}\text{B g/cm}^2$
	最高濃縮度	$k_{\text{eff}}+2\sigma$	最高濃縮度	最高濃縮度
B8_62A	3.8 wt %	0.93469	3.6 wt%	3.5 wt%

表 6.1.5-10 正常狀況、異常事件與意外事故下護箱臨界分析結果

狀況 條件*	傳送護箱				混凝土護箱		
	正常狀況		意外事故		正常狀況	異常事件	意外事故
密封鋼筒外部	乾	溼	溼	乾	乾	溼	溼
密封鋼筒內部	乾	溼	溼	溼	乾	乾	溼
護套間隙	乾	乾	溼	溼	乾	乾	溼
k_{eff}	0.36798	0.91649	0.92053	0.92096	0.35771	0.35944	0.92047
σ	0.00103	0.00072	0.00073	0.00075	0.00124	0.00115	0.00076
$k_{\text{eff}} + 2\sigma$	0.37004	0.91793	0.92199	0.92246	0.36019	0.36174	0.92199
Margin	0.56716	0.01927	0.1521	0.01474	0.57701	0.57546	0.01521
USL	0.9372						

* 燃料濃縮度 3.3 wt% ^{235}U ；中子吸收板 ^{10}B 有效面積密度 0.020g/cm^2 ；採用所有會使反應度增大的設置。

表 6.1.5-11 燃料束製造公差與反應度

傳送護箱					
	$k_{\text{eff}} + 2\sigma$			$\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$	
製造公差	Nominal	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
燃料棒晶格間距	0.92246	0.91948	0.92303	-2.81	0.54
燃料棒外徑	0.92246	0.92420	0.91933	1.70	-2.95
燃料護套厚度	0.92246	0.92147	0.92168	-0.93	-0.71
燃料丸直徑	0.92246	0.92188	0.92284	-0.48	0.38
有效燃料長度	0.92246	0.92071	0.92211	-1.64	-0.36

表 6.1.5-12 合併燃料束製造公差的最大反應度

	$k_{\text{eff}} + 2\sigma$	$\Delta(k_{\text{eff}} + 2\sigma)$	Margin	$\Delta k_{\text{eff}}/\sigma$
傳送護箱	0.92516	0.0027	0.01204	2.55

(六) 結語

本臨界安全分析，首先說明了護箱臨界評估的計算模式，在計算模式中，無論是各個系統參數的設定，還是計算機程式模式的建立，已結合所有最保守的組態設置和參數設定，儘可能涵蓋所有可預期會造成反應度增加的事件與情況，其間並採極限涵蓋分析法的邏輯，來滿足法規儘可能保守的要求和簡化問題的複雜度。

接者說明了護箱的次臨界安全基準，並以 186 組標準臨界實驗對 MCNP5 計算機程式進行驗證計算，所得結果則依據統計規則匯入次臨界安全基準內，得到一可供護箱臨界評估用來判定護箱在各種正常狀況、異常事件和意外事故下，是否都能符合法規對於護箱要維持次臨界要求的安全限制 USL(0.9372)。

所評估的護箱為本系統之傳送護箱與混凝土護箱，所評估的核二廠待貯存核子燃料型式 GE8x8-2 和 ANF8x8-2，已驗證可被本分析所使用之設計基準燃料 B8_62A 型式所涵蓋。在以反應度最大的燃料束幾何/組態及反應度最大的提籃幾何/組態設置，與 ^{10}B 有效面積密度為 0.027 g/cm^2 、 0.0225 g/cm^2 和 0.020 g/cm^2 的情況下，傳送護箱最高可容許軸向面平均濃縮度分別為 3.8 wt% ^{235}U 、3.6 wt% ^{235}U 和 3.5 wt% ^{235}U 。若將 ^{10}B 有效面積密度降為 0.02 g/cm^2 ，軸向面平均濃縮度降至 3.3 wt% ^{235}U ，則傳送護箱於正常狀況下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 最大值為 0.91793；於意外事故下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 最大值為 0.92246。混凝土護箱於正常狀況下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 為 0.36019；於異常事件下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 為 0.36174；於意外事故下其 $k_{\text{eff}}+2\sigma$ 為 0.92199。顯示本系統貯存 GE8x8-2 及 ANF8x8-2 核子燃料時，系統具有額外的安全餘裕。亦即，在提籃內部設置為反應度最強的設置方式下，包括程式偏差值與所有不準度，傳送護箱和混凝土護箱兩者均能滿足法規對於 k_{eff} 值要小於 0.95 的規定。

(七) 參考文獻

1. 10 CFR 72, “Licensing Requirements for the Independent Storage of Spent Nuclear Fuel, High-Level Radioactive Waste and Reactor-Related Greater Than Class C Waste,” Code of Federal Regulations, US Government, Washington, DC.
2. NUREG-1536, “Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems,” US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, January 1997.
3. “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5,” X-5 Monte Carlo Team, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, April 24, 2003.
4. CC-710/MCNP: Data Libraries for MCNP5, “MCNP5 DATA: Standard Neutron, Photoatomic, Photonuclear, and Electron Data Libraries for MCNP5,” February 2003.
5. CCC-545-NUREG/CR-0200, “Standard Composition Library,” Petrie, L.M., et al., Rev. 6, Volume 3 Section M8, September 1998.
6. NUREG/CR-6361, “Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Packages,” US Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, March 1997.
7. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments, NEA/NSC/DOC(95)03, September 2003.
8. NAC International, Inc., “NewGen Transfer and Storage Criticality Analysis”, 71160-6001 Rev. 0.