

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	6.1.3-2
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	6.1.4-3
3. 驗證計算結果	6.1.4-4
4. keff 值與主要系統參數的相關性分析	6.1.4-5
(五) 分析結果	6.1.5-1
1. 決定設計基準燃料	6.1.5-1
2. 決定提籃結構中段的代表性區域	6.1.5-1
3. 均勻化與非均勻化濃縮度燃料束反應度評估	6.1.5-2
4. 提籃結構機械性偏移與幾何尺寸製造公差對反應度的影響	6.1.5-3
5. 護箱在正常、異常與事故情況的臨界分析	6.1.5-5
6. 各燃料型式的最大平均初始濃縮度	6.1.5-7
7. 傳送護箱內部水位高度變化和頂部結構對反應度的影響評估	6.1.5-8
(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 提籃結構中段由導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落示意圖	6.1.3-7
圖 6.1.3-2 提籃內單一晶格橫切圖	6.1.3-8
圖 6.1.3-3 傳送護箱之橫切面	6.1.3-9
圖 6.1.3-4 混凝土護箱之橫切面	6.1.3-10
圖 6.1.3-5 三維傳送護箱 Shl 頂部情況之縱切面	6.1.3-11
圖 6.1.3-6 三維傳送護箱 Wnc 頂部情況之縱切面	6.1.3-12
圖 6.1.4-1 驗證計算所得 k_{eff} 值分佈圖	6.1.4-6
圖 6.1.4-2 驗證計算所得 k_{eff} 值對濃縮度之散佈圖	6.1.4-7
圖 6.1.4-3 驗證計算所得 k_{eff} 值對燃料棒間距之散佈圖	6.1.4-8
圖 6.1.4-4 驗證計算所得 k_{eff} 值對水鈾體積比之散佈圖	6.1.4-9
圖 6.1.4-5 驗證計算所得 k_{eff} 值對 Boral ^{10}B 面密度之散佈圖	6.1.4-10
圖 6.1.5-1 燃料束和燃料管機械性偏移方向示意圖	6.1.5-9

附表目錄

表 6.1.2-1 核一廠核子燃料基本資料.....	6.1.2-2
表 6.1.3-1 護箱臨界評估分析項目與相關計算條件.....	6.1.3-13
表 6.1.3-2 材料物理密度.....	6.1.3-14
表 6.1.3-3 有效燃料區的材料組成.....	6.1.3-14
表 6.1.3-4 護箱的材料組成.....	6.1.3-15
表 6.1.3-5 提籃結構非有效燃料區段均質化材料組成.....	6.1.3-16
表 6.1.4-1 B&W 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽.....	6.1.4-11
表 6.1.4-2 PNL 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽.....	6.1.4-13
表 6.1.5-1 決定設計基準燃料傳送護箱臨界分析計算結果.....	6.1.5-10
表 6.1.5-2 決定設計基準燃料混凝土護箱臨界分析計算結果.....	6.1.5-10
表 6.1.5-3 提籃結構中段代表區域臨界分析計算結果.....	6.1.5-10
表 6.1.5-4 均勻化與非均勻化濃縮度傳送護箱臨界分析計算結果.....	6.1.5-11
表 6.1.5-5 均勻化與非均勻化濃縮度混凝土護箱臨界分析計算結果.....	6.1.5-11
表 6.1.5-6 提籃結構機械性偏移與幾何尺寸製造公差傳送護箱臨界分析計算結果	6.1.5-12
表 6.1.5-7 提籃結構的機械性偏移與幾何尺寸製造公差混凝土護箱臨界分析計算結 果.....	6.1.5-13
表 6.1.5-8 正常情況下傳送護箱臨界分析計算結果.....	6.1.5-14
表 6.1.5-9 事故情況下傳送護箱臨界分析計算結果.....	6.1.5-15
表 6.1.5-10 正常和異常情況下混凝土護箱臨界分析計算結果.....	6.1.5-15
表 6.1.5-11 事故情況下混凝土護箱臨界分析計算結果.....	6.1.5-16
表 6.1.5-12 最大平均初始濃縮度傳送護箱和混凝土護箱臨界計算結果.....	6.1.5-16
表 6.1.5-13 傳送護箱頂部結構暨密封鋼筒不同水面高度臨界計算結果.....	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評估的計算結果。所評估的護箱分別為經本計畫改良之傳送護箱(INER-HPS 傳送護箱)和 NAC 原設計的混凝土護箱，在護箱內的密封鋼筒為 NAC 原設計的密封鋼筒；所評估的核子燃料分別為 GE8x8-1、GE8x8-2、GE9B、SPC8x8 與 ATRIUMTM-10 等五種燃料型式。在整個分析過程中，無論是計算機程式模式的建立，還是各個系統參數的設定，其基本的邏輯是極限涵蓋分析法(bounding analysis)，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。

本節首先說明設計準則和待貯存之用過核子燃料性質，接著為分析模式，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；再來為實驗驗證評估，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；再來為分析結果，包括決定設計基準燃料、決定提籃結構中段的代表性區域、均勻化與非均勻化濃縮度燃料束反應度評估、評估吊籃結構的機械性偏移與幾何尺寸製造公差對反應度的影響、護箱在正常異常與事故情況下的臨界分析、各燃料型式的最大平均初始濃縮度和傳送護箱頂部結構暨內部不同水位高度的臨界分析；最後是結語。

(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、異常與事故情況下，有效中子增殖因數(k_{eff})皆應小於或等於 0.95，以滿足 10CFR72.124 和 10CFR72.236(c)的法規要求，以及 NUREG-1536 (Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems) 第七章和 NUREG-1567 (Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities) 第八章等兩份標準審查計畫(SRP)之要求。

核一廠所擁有的核子燃料計有 GE8x8-1、GE8x8-2、GE9B、GE12、SPC8×8 與 ATRIUM™-10 共六種燃料型式，其中 GE8x8-1、GE8x8-2、GE12 (只有 4 束)、SPC8×8 與 GE9B 已全數退出爐心，並存放於燃料池中；部分 ATRIUM™-10 型式燃料用於最後一週期之爐心燃料，尚未全數退出至燃料池。表 6.1.2-1 列出了這幾種核子燃料型式的基本資料。其中，以鈾 235 的濃縮度對燃料束的反應度影響最大，其次則為有效堆疊密度 (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 的量，另一為燃料棒之間緩和劑水的量。另外，在表中也分別列出了燃料束所有晶格整個平均的濃縮度和燃料束中單層晶格的最大濃縮度。

本臨界評估會從 GE8x8-1、GE8x8-2、GE9B 與 SPC8×8 這四種型式的核子燃料中挑出反應度最大者，做為設計基準燃料，相關計算結果請見本章一、(五)節。上述四種型式燃料為本案待運貯燃料之可能選擇，另 ATRIUM™-10 型式燃料雖非本案之可能選擇，但經評估若納入運貯仍可滿足次臨界之要求。

表 6.1.2-1 核一廠核子燃料基本資料

燃料棒參數	GE8x8-1 ^{*1}	GE8x8-2 ^{*2}	SPC8x8 ^{*3}	GE9B ^{*4}	ATRIUM™-10 ^{*5}
外直徑, cm	1.252	1.227	1.229	1.227	1.005
護套內直徑, cm	1.08	1.064	1.052	1.064	0.884
護套材質	Zr-2	Zr-2	Zr-2	Zr-2	Zr-2
有效堆疊 (stacked) 密度, g/cm ³	10.32	10.32	10.26	10.45	10.349
燃料丸直徑, cm	1.057	1.041	1.027 / 1.03 ^{*6}	1.044	0.867
軸向最高面平均 (peak-planar-average) 濃 縮度, wt% U-235	1.95	3.25	3.24	3.69	4.562
燃料束參數	GE8x8-1	GE8x8-2	SPC8x8	GE9B	ATRIUM™-10
燃料束最大平均濃縮度, wt% U-235	1.90	3.05	3.14	3.302	4.068
燃料棒陣列	8X8	8x8	8x8	8x8	10x10
燃料棒數	63	62	62	60	91 (full-length : 83, part-length : 8)
有效燃料長度, cm	370.84	381.0	381.0	381.0	379.6
燃料棒間距, cm	1.626	1.626	1.628	1.626	1.295
水棒數	1	2	2	1	1 (square water channel displace 9 fuel rods)
水棒材質	Zr-2	Zr-2	Zr-2	Zr-2	Zr-4
水棒外直徑, cm	1.252	1.501	1.229	3.404	3.50
水棒內直徑, cm	1.08	1.349	1.052	3.20	3.355
燃料匣內距, cm	13.406	13.406	13.406	13.406	13.406
燃料匣厚度, cm	0.254	0.254	0.254	0.254	0.203
燃料匣材質	Zr-4	Zr-4	Zr-4	Zr-4	Zr-2
統計至 87/4/30 退出總束數	GE8x8-1	GE8x8-2	SPC8x8	GE9B	
一號機	408	432	800	172	
二號機	408	460	716	112	

*1) 資料來源：GE NEDC-20128

*2) 資料來源：GE NEDC-25227

*3) 資料來源：XN-NF-86-126(P) Rev.0

*4) 資料來源：GE EDB No. 1939

*5) 資料來源：Framatome ANP EMF-2892(P) Revision 0

*6) 對高濃縮度燃料丸為 1.03，對其它則為 1.027

(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[1]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。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。

本臨界計算使用 MCNP5(2005)版本，搭配其所附的中子截面庫來進行，而該程式與中子截面庫的驗證計算，請見本章一、(四)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；
- 除了燃料匣（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，例如：燃料棒間隔板（spacer grids）和上下端板；
- 不模擬燃料束內的中子毒物；
- 燃料的物理密度若依照國際慣例為 UO_2 理論密度的 95 %，即 $10.96 \times 95\% = 10.412 \text{ g/cm}^3$ ，但因為 GE9B 的有效堆疊密度可以達到 10.45 g/cm^3 的水準，所以假設所有燃料型式的燃料密度皆為 10.45 g/cm^3 ；
- 設計基準燃料的濃縮度為 4.0 wt% ^{235}U ；
- 最佳的緩和劑為室溫下密度 1.0 g/cm^3 的純水；
- 臨界控制是以固定在提籃內的中子吸收物，其 ^{10}B 的原子密度降為面密度 $0.011 \text{ }^{10}\text{B g/cm}^2$ 的 75 %；
- 事故情況下，保守假設 100 %燃料護套破損，水注入燃料丸與護套間空隙。

3. 計算機程式模式

傳送護箱和混凝土護箱其內部中空部分為密封鋼筒的存放位置，而用過核子燃料束則是存放在密封鋼筒內部的提籃結構裡。密封鋼筒的外殼由 304 不鏽鋼構成，軸向長度 483.616 cm，其半徑為 85.165 cm，圓柱面厚度 1.5875 cm，底座厚度 4.45 cm，上蓋有兩層，內層為厚度 17.78 cm 的屏蔽上蓋，外層為厚度 7.62 cm 的結構上蓋。

密封鋼筒內部中空部分為提籃結構，該結構主要由 56 個方型燃料管、41 片碳鋼承載圓盤與 17 片鋁質導熱圓盤所組成，軸向長度 451.866 cm，承載圓盤單片厚 1.587 cm，導熱圓盤單片厚 1.27 cm，相鄰承載圓盤的間距為 8.128 cm，由下往上從第 10 片承載圓盤開始至第 27 片承載圓盤為止，每個間隙再加入一片導熱圓盤，相鄰承載圓盤與導熱圓盤的間距為 3.429 cm，每片圓盤都有 56 個方形開口，56 個燃料管便是穿過這 58 片圓盤所造出的 56 個方型通道中，而各別用過核子燃料束則是存放在各個燃料管裡。

燃料管的材質為 304 不鏽鋼，每個燃料管有四個面；56 個燃料管，有 42 個含兩面中子吸收物，有 11 個一面含中子吸收物，有 3 個則不含中子吸收物。

以燃料管的大小來看，標準尺寸（內圍邊長 14.986 cm 的正方形）有 52 個，超大尺寸（內圍邊長 15.37 cm 的正方形）有 4 個，以容納彎曲程度較大之燃料束，而這 4 個超大燃料管周圍的圓盤開口也相對較大。

本報告所評估的傳送護箱是重量減輕的改良式傳送護箱，與 NAC UMS 原標準傳送護箱相比，在傳送護箱外殼的鉛屏蔽厚度，由原先的 10.16 cm 減至 7.96 cm，底部屏蔽門的厚度，由原先的 22.86 cm 減至 19.86 cm，而中子屏蔽的厚度仍為 6.98 cm 不變。

在建立傳送護箱與混凝土護箱的計算機程式模式時，為了獲取最高的反應度（最保守）和簡化問題的複雜度，絕大部分的分析項目皆是以三維無限軸向模式來計算，只有一小部分必須詳細模擬傳送護箱軸向結構才能分析的項目是以三維詳細軸向模式來計算。

首先說明傳送護箱與混凝土護箱的三維無限軸向模式。為了保守獲取最高的反應度，觀察提籃結構最具代表性的區域和考慮選用適當的邊界條件，讓整個系統無中子漏失（non-neutron leakage）。此提籃結構中段代表性區域之外，為對應的密封鋼筒軸向段落，再外則為對應的傳送護箱軸向段落或混凝土護箱軸向段落，最外圍則分別為一定厚度的水，即傳送護箱與傳送護箱之間距 250 cm，混凝土護箱與混凝土護箱之間距 460 cm。再藉由 x、y、z 三個方向週期性的邊界條件的使用，而分別形成一組

對應傳送護箱，以及一組對應混凝土護箱的軸向無限延伸 xy 方向無限列陣的計算機程式模式。

提籃結構中段有兩組代表性區域，一組為導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落，另一組為承載圓盤-間隙所構成的段落，經過計算比較後，以導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落較保守，因為導熱圓盤取代部分水的位置，而水會將中子減速增加其周圍中子吸收物的吸收效率。圖 6.1.3-1 為此中段代表性區域導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落示意圖。另外，在分析時一併評估了圓盤開口中心對中心距離對反應度的影響。圖 6.1.3-2 為 MCNP5 所繪出提籃內單一圓盤開口的橫切面圖，其中的 GE9B 燃料束與燃料管皆為置中的情形。圖 6.1.3-3 為傳送護箱的橫切面，圖 6.1.3-4 為混凝土護箱的橫切面。

傳送護箱的三維詳細軸向模式，是引用 NAC 原屏蔽分析所用的三維傳送護箱計算機程式模式[13]，並修改其中的有效燃料區域而成。此模式有詳細模擬傳送護箱的底部屏蔽門、外殼、一對吊耳以及四種頂部情況，這四種情況皆有屏蔽上蓋，其不同處在於屏蔽上蓋上方和屏蔽上蓋的開孔有無用孔蓋蓋住，分別敘述如下：

- (1) Stl 情況 — 增加結構上蓋，屏蔽上蓋的開孔用孔蓋蓋住；
- (2) Wcv 情況 — 增加鉚接屏蔽，屏蔽上蓋的開孔用孔蓋蓋住；
- (3) Shl 情況 — 只有屏蔽上蓋，屏蔽上蓋的開孔沒用孔蓋蓋住；
- (4) Wnc 情況 — 增加鉚接屏蔽，屏蔽上蓋的開孔沒用孔蓋蓋住。

其中第(1)和第(2)種情況對應乾的密封鋼筒，第(3)和第(4)種情況對應溼的密封鋼筒，此處是保守選用第(3)和第(4)種情況來作臨界分析計算。原模式在模擬提籃結構時，是將燃料束、燃料管、中子吸收物及燃料管之間的圓盤予以均質化，由下而上依序分為下端板區(lower end fitting, LEF)、有效燃料區(active fuel)、氣室區(upper plenum, UPL)和上端板區(upper end fitting, UEF)四段均質化材質，而在 56 個燃料管之外的圓盤材質則是一片一片的模擬。為了進行臨界分析，NAC 原模式的均質化有效燃料區段改以在三維無限軸向模式所建立的詳細模擬取代，並重新調整此

區段外的支撐圓盤和導熱圓盤間距，以符合 41 片支撐圓盤和 17 片導熱圓盤的設計（原模式只有 16 片導熱圓盤）。

此單一個傳送護箱周圍包覆著一厚度為 30.48 cm 的空區，使用真空邊界條件，提籃結構處於反應度最大的設置方式，為保守起見，假設護套間隙注滿密度為 1.0 g/cm^3 的水。藉由模擬傳送護箱內部不同的水位高度，以評估傳送護箱注洩水時之反應度變化。圖 6.1.3-5 為 MCNP5 所繪出的三維傳送護箱 Shl 頂部情況縱切面，圖 6.1.3-6 為三維傳送護箱 Wnc 頂部情況縱切面。。

4. 分析項目

表 6.1.3-1 列出了所有臨界評估的分析項目與重要參數設定，前三項分析項目提籃內部的設置方式採用標準方式。標準設置方式是指燃料束置於燃料管的正中間，燃料管置於圓盤開口的正中間。每個分析項目都會以傳送護箱和混凝土護箱，分別進行臨界計算，以確保各項分析的結果一致。以下分別說明各項分析工作：

- (1) 決定設計基準燃料 – 從核一廠用過核子燃料型式中找出反應度最大者，作為設計基準燃料，分析時假定各燃料型式的初始軸向最高面平均濃縮度（peak-planar-average）皆為 $4.0 \text{ wt}\% \text{ }^{235}\text{U}$ 。以下第(2)~(7)項分析項目皆以設計基準燃料為護箱所裝載的燃料。
- (2) 決定提籃結構中段的代表性區域 – 評估兩組代表性區域何者較保守。
- (3) 均勻化與非均勻化濃縮度燃料束反應度評估 – 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。
- (4) 評估提籃結構的機械性偏移與幾何尺寸製造公差對反應度的影響 – 考慮燃料束在燃料管內可以自由移動，燃料管在圓盤開口所構成的通道內可以自由移動，以及燃料管尺寸和圓盤開口尺寸的製造公差等因素對護箱反應度的影響，目的在找出能讓反應度最大的組合。
- (5) 護箱在正常、異常與事故情況下的臨界分析 – 結合提籃內部反應度最

大的設置方式，評估傳送護箱與混凝土護箱在三種情況下是否都能滿足法規對於要維持次臨界的要求。

- (6) 各燃料型式的最大平均初始濃縮度 – 結合提籃內部反應度最大的設置方式，在最嚴重的事故情況和滿足法規對於要維持次臨界的要求下，評估各燃料所能允許的最大平均初始濃縮度。
- (7) 傳送護箱內部不同水位高度的臨界分析 – 結合提籃內部反應度最大的設置方式，在最嚴重的事故情況下，評估傳送護箱內部水位高度變化和傳送護箱頂部在屏蔽蓋之上有無銲接屏蔽 (weld shield) 對反應度的影響。

5. 材料密度與組成

表 6.1.3-2、6.1.3-3、6.1.3-4 及 6.1.3-5 為在臨界計算中所使用的材料密度與組成，其中表 6.1.3-5 僅用在三維詳細軸向模式內，除了 UO_2 燃料之外，其餘請參考文獻[2]。

依據 NUREG-1536 第 7.5.3.2 節和 NUREG-1567 第 8.4.1.2 節對於中子吸收物持續效力的相關規定，包括中子吸收物不會因長時間加馬射線照射而劣化、在貯存期間該吸收物保持結構的完整和證明在貯存期間來自用過核子燃料的中子通率造成中子吸收物的消耗是可忽視的。前兩項已由中子吸收物的製造廠家提供測試證明文件，至於第三項，以屏蔽分析 SAS2H 程式計算之中子射源強度 (40 GWD/MTU, 23 kW)，假定在 50 年的貯存期間此中子射源強度維持不變，Boral 中的 ^{10}B 原子 50 年下來減少的比率為 5×10^{-9} ，所以因中子吸收而造成中子吸收物的消耗是可忽視的。另外結構分析的結果顯示，在所有可預期的事故情況下，用來固定 Boral 在燃料管上的包覆護套並不會脫落，因此不需提供額外的監視計畫來監控中子吸收物的持續效力。

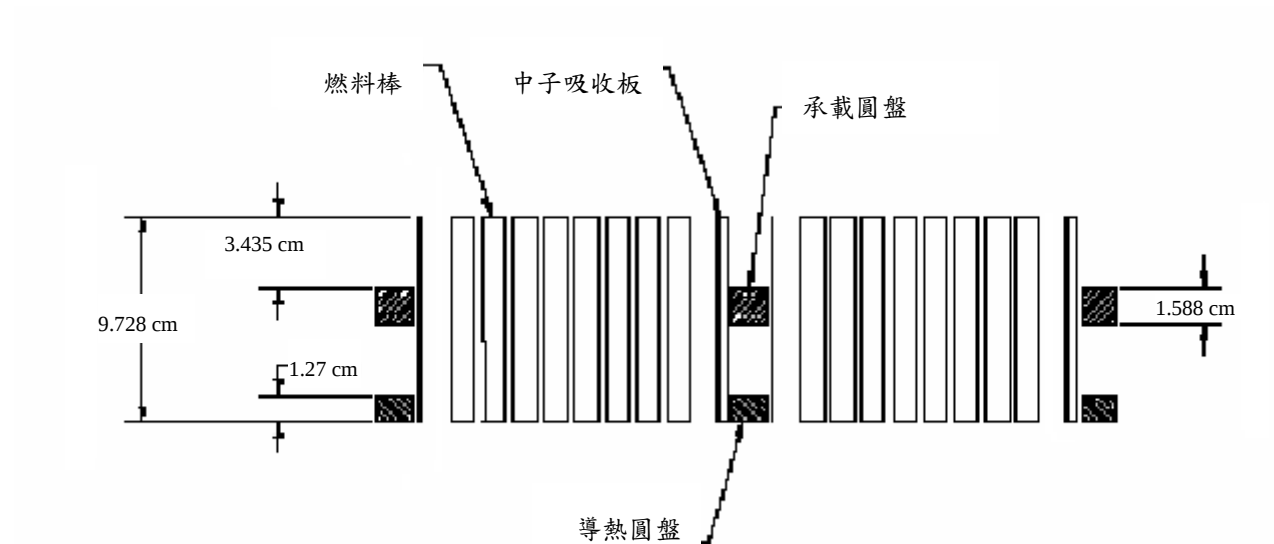


圖 6.1.3-1 提籃結構中段由導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落示意圖

```

08/22/05 11:15:52
NACBWR_100T_TFR_XY_PER_4S_DBFAna
lysis_GE9B_g36918g43_40e_BUC_175
763_Z0800layer.i
probid = 08/22/05 11:13:11
basis:
( 1.000000, 0.000000, 0.000000)
( 0.000000, 1.000000, 0.000000)
origin:
( 0.00, 8.80, 1.00)
extent = ( 8.80, 8.80)

```

顏色材質對照表

紫色-UO₂燃料

水藍色-水

淺綠色-中子吸收物

藍色方框-Zr燃料匣

淺粉色方框-304不鏽鋼燃料管

黃色方框-鋁質導熱圓盤

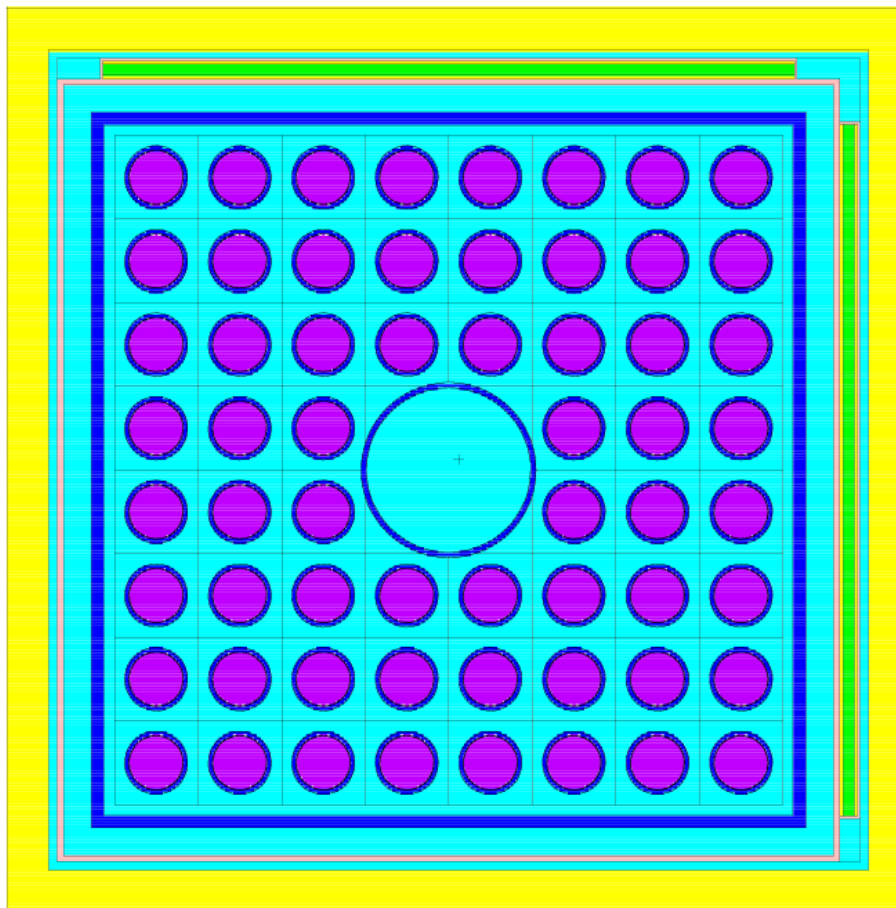


圖 6.1.3-2 提籃內單一晶格橫切圖

```

10/11/05 17:04:27
FILE:NACBWR_INER_TFR_XY_PER_4S_D
BFAnalysis_GE9B_g36918g43_40e_Z0
800layer.i
probid = 10/11/05 17:01:51
basis:
( 1.000000, 0.000000, 0.000000)
( 0.000000, 1.000000, 0.000000)
origin:
( 0.00, 0.00, 1.00)
extent = ( 125.00, 125.00)

```

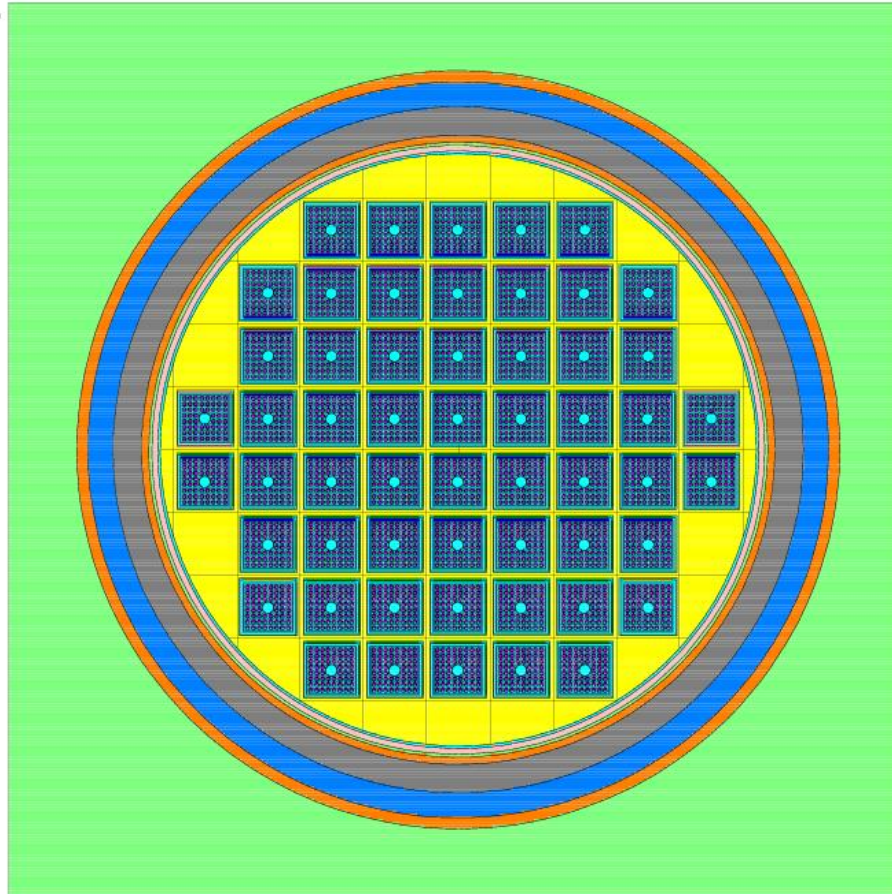


圖 6.1.3-3 傳送護箱之橫切面

```
09/14/05 13:04:57
NACBWR_VCC_XY_PER_2S_DBFAnalysis
_GE9B_g36918g43_40e_BUC_175763_Z
0800layer.i
probid = 09/14/05 13:02:18
basis:
( 1.000000, 0.000000, 0.000000)
( 0.000000, 1.000000, 0.000000)
origin:
( 0.00, 0.00, 2.00)
extent = ( 230.00, 230.00)
```

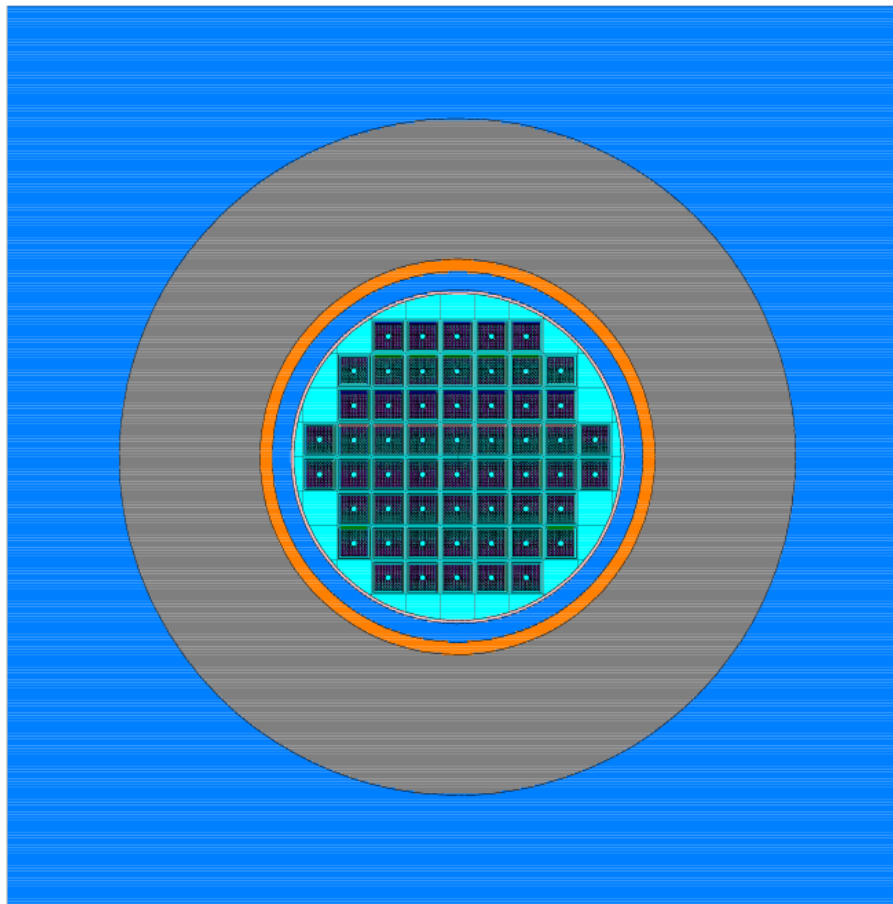


圖 6.1.3-4 混凝土護箱之橫切面

```

02/17/06 15:19:26
c 3D_INER_TFR_GE
9B_water_to_UPL_Top.i

probid = 02/17/06 15:18:05
basis:
( 0.000000, 1.000000, 0.000000)
( 0.000000, 0.000000, 1.000000)
origin:
( 0.00, 0.00, 20.50)
extent = ( 285.00, 285.00)

```

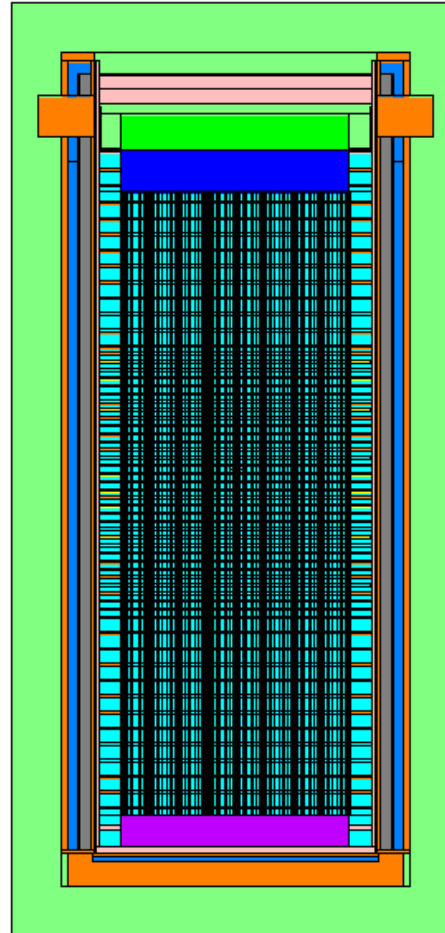


圖 6.1.3-5 三維傳送護箱 Shl 頂部情況之縱切面

```

03/02/06 15:22:03
c 3D_INER_TFR_GE
9B_water_to_UPL_Top.i

probid = 03/02/06 14:50:50
basis:
( 0.000000, 1.000000, 0.000000)
( 0.000000, 0.000000, 1.000000)
origin:
( 0.00, 0.00, 10.00)
extent = ( 300.00, 300.00)

```

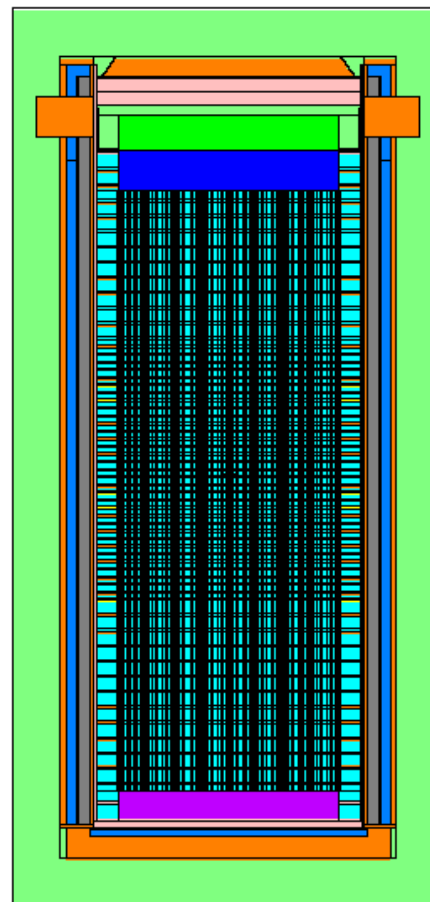


圖 6.1.3-6 三維傳送護箱 Wnc 頂部情況之縱切面

表 6.1.3-1 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	決定設計基 準燃料	決定提籃結 構中段的代 表性區域	均勻化與非均 勻化濃縮度燃 料束反應度評 估	提籃結構的機械 性偏移與幾何尺 寸製造公差對反 應度的影響	護箱在正常、異 常與事故情況 下的臨界分析	各燃料型式的 最大平均初始 濃縮度	護箱內部水位高 度變化和頂部結 構對反應度的影 響
計算機程式與中 子截面庫	MCNP5 & .66c xs (其中只有元素 Cr、Fe 與 Ni 使用 .50c, Si 使用 .60c)						
計算機程式模式	三維無限軸向模式						三維詳細軸向模 式
±z 邊界條件	由於 MCNP 無法在 x、y、z 三個方向同時使用週期性的邊界條件，因此在 z 方向改以週期性的重複出現來近似週期性的邊界條件，所有的計算結果都是以收斂後的值為準。						真空邊界
±x 與 ±y 邊界條件	週期邊界 (護箱在 x 與 y 方向排成無限列陣)						真空邊界
濃縮度(wt% ²³⁵ U)	4.0	4.0	實際分佈、3.69 和 4.0	4.0	4.0	4.372、4.5 和 4.6 ^{*3}	4.0
I.C. ^{*1} 水密度(g/cm ³)	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0001~1.0	1.0	水面以上：0.0001 水面以下：1.0
O.C. ^{*2} 水密度(g/cm ³)	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0001~1.0	0.0001	0.0001
fuel-to-clad gap 水密度(g/cm ³)	0.0	0.0	0.0	0.0	正常：0.0 異常：0.0 事故：1.0	1.0	1.0
提籃內部設置方 式	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	反應度最大
護箱種類	傳送、混凝土	傳送、混凝土	傳送、混凝土	傳送、混凝土	傳送、混凝土	傳送、混凝土	傳送

*1：inside canister。*2：outside canister。*3：GE9B 使用 4.5 和 4.6，ATRIUMTM-10 使用 4.372 和 4.5。

表 6.1.3-2 材料物理密度

材料	物理密度 (g/cm ³)
UO ₂	10.412
Zircaloy	6.56
H ₂ O	1.0
Stainless steel	7.92
Carbon steel	7.82
Lead	11.35
Aluminum	2.70
BORAL	2.68
NS-4-FR	1.63
Concrete	2.24

表 6.1.3-3 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 4.0 wt%	²³⁵ U	9.441×10^{-4}
	²³⁴ U	7.587×10^{-6}
	²³⁸ U	2.236×10^{-2}
	O	4.661×10^{-2}
Zircaloy	Zr	4.331×10^{-2}
H ₂ O	H	6.677×10^{-2}
	O	3.338×10^{-2}

表 6.1.3-4 護箱的材料組成

材料	元素	原子密度 (atoms/barn-cm)
BORAL	^{10}B	2.212×10^{-3}
	^{11}B	1.219×10^{-2}
	C	3.786×10^{-3}
	Al	5.217×10^{-2}
Aluminum	Al	6.031×10^{-2}
Steel 304	Cr	1.743×10^{-2}
	Fe	5.936×10^{-2}
	Ni	7.721×10^{-3}
	Mn	1.736×10^{-3}
Carbon steel	C	3.925×10^{-3}
	Fe	8.350×10^{-2}
Lead	Pb	3.297×10^{-2}
NS-4-FR	H	5.854×10^{-2}
	O	2.609×10^{-2}
	C	2.264×10^{-2}
	N	1.394×10^{-3}
	Al	7.763×10^{-3}
	^{11}B	3.422×10^{-4}
	^{10}B	8.553×10^{-5}
Concrete	O	4.494×10^{-2}
	Si	1.621×10^{-2}
	H	1.340×10^{-2}
	Na	1.704×10^{-3}
	Ca	1.483×10^{-3}
	Fe	3.386×10^{-4}
	Al	1.702×10^{-3}

表 6.1.3-5 提籃結構非有效燃料區段均質化材料組成

材料	元素	原子密度 (atoms/barn-cm)
Lower End Fitting (dry canister)	Cr	3.1099×10^{-3}
	Mn	3.0982×10^{-4}
	Fe	1.0592×10^{-2}
	Ni	1.3776×10^{-3}
Lower End Fitting (wet canister)	H	5.4858×10^{-2}
	O	2.7429×10^{-2}
	Cr	3.1099×10^{-3}
	Mn	3.0982×10^{-4}
	Fe	1.0592×10^{-2}
	Ni	1.3776×10^{-3}
Upper Plenum (dry canister)	C	7.4574×10^{-5}
	Cr	4.8369×10^{-4}
	Mn	4.8188×10^{-5}
	Fe	3.2337×10^{-3}
	Ni	2.1427×10^{-4}
	Zr	4.3248×10^{-3}
Upper Plenum (wet canister)	H	4.3814×10^{-2}
	O	2.1907×10^{-2}
	C	7.4574×10^{-5}
	Cr	4.8369×10^{-4}
	Mn	4.8188×10^{-5}
	Fe	3.2337×10^{-3}
	Ni	2.1427×10^{-4}
	Zr	4.3248×10^{-3}
Upper End Fitting (dry canister)*	Cr	1.2561×10^{-3}
	Mn	1.2514×10^{-4}
	Fe	4.2780×10^{-3}
	Ni	5.5644×10^{-4}

(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）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 = 考慮各種正常或事故情況下，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在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在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。

有兩種統計方法可用來決定 USL 的值，一為 USL-1 (Confidence Band with Administrative Margin)，另一為 USL-2 (Single Sided Uniform with Close Approach)；兩者都需要做 k_{eff} 值對實驗系統主要參數的線性迴歸分析，實驗系統的主要參數包括濃縮度、燃料棒間距 (rod pitch)、水鈾體積比 (H/U volume ratio) 和通率圈套 (flux trap) 厚度等，以其中相關係數最高的迴歸線，配合上述之兩種統計模式，求得 USL 與該相關係數最高的系統參數間的函數關係，這是 NUREG/CR6361 建議採行的方法。

然而，如果沒有存在統計上顯著的相關性，就可以用一個固定的值來調整 β 的不準度，此值一般是採用 95 信心/95 機率的單側容忍因子 (one-side tolerance factor)。將 $\Delta k_m = 0.05$ 帶入(3)式並改寫為：

$$k_s + \Delta k_s + \beta + \Delta\beta \leq 0.95 \quad (6)$$

β 的算法為 1 減去標準臨界實驗驗證計算所得的平均 k_{eff} 值； $\Delta\beta$ 的算法為：標準臨界實驗驗證計算所得的平均 k_{eff} 值的標準偏差之平方 (σ_{mean}^2)，減去標準臨界實驗驗證計算的平均蒙地卡羅誤差之平方 (σ_{mc}^2)，再加上標準臨界實驗的實驗誤差之平方 (σ_{exp}^2)；將此值開根號後再乘以依據所計算的標準臨界實驗組數查表而得的 95 信心/95 機率的單側容忍因子 (one-side tolerance factor $f_{95/95}$) 即可。分別以(7)式與(8)式表達如下：

$$\beta = 1 - k_c \quad (7)$$

$$\Delta\beta = \left(\sigma_{\text{mean}}^2 - \sigma_{\text{mc}}^2 + \sigma_{\text{exp}}^2 \right)^{1/2} \times f_{95/95} \quad (8)$$

將 k_s 改換為 k_{eff} ， k_{eff} 為各項臨界分析的計算結果，重新定義 k_s 為考慮程式偏差值與所有不準度之後所得之 k_{eff} 值。即：

$$k_s = k_{eff} + \Delta k_s + \beta + \Delta \beta \leq 0.95 \quad (9)$$

(9)式即為護箱臨界評估分析時所套用的次臨界安全基準。

2. 標準臨界實驗說明

本報告一共模擬了 138 個臨界實驗，其中 34 個為 B&W 公司[3]使用濃縮度 2.46 wt% 的 UO_2 燃料棒，排列 9 個燃料棒叢集 (fuel cluster) 成 3×3 (類似井字) 列陣，每個燃料棒叢集的大小為 14×14，在下列不同的條件下藉由調整水面高度與硼酸濃度來達到臨界，這些條件包括：燃料棒叢集與燃料棒叢集的間距、燃料棒叢集與燃料棒叢集間放置的 B_4C 棒數，以及燃料棒叢集與燃料棒叢集間放置不同材質的中子吸收板。

80 個為 PNL 實驗室[4~7]使用濃縮度 2.35 wt % 與 4.31 wt % 的 UO_2 燃料棒，分別排列 3 個燃料棒叢集成 3×1 列陣，各濃縮度有兩種燃料棒間距 (rod pitch)，在下列不同的條件下藉由調整燃料棒叢集與燃料棒叢集間的距離或燃料棒叢集的大小來達到臨界，這些條件包括：在燃料棒叢集與燃料棒叢集間放置不同材質的中子吸收板以及使用不同材質的反射牆。

24 個為 PNL flux trap 臨界實驗[7~9]，使用濃縮度 4.31 wt % 的 UO_2 燃料棒，分別排列 2 個燃料棒叢集成 2×1 列陣和 4 個燃料棒叢集成 2×2 列陣，在燃料棒叢集間放置不同種類和不同設置型式的中子吸收板，藉由調整燃料棒叢集與燃料棒叢集間的距離或燃料棒叢集的大小來達到臨界。

這些用來做驗證計算的臨界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和典型的輕水式反應器燃料相同。燃料濃縮度從 2.35 到 4.31 wt% ^{235}U ，燃料丸外直徑從 1 cm 到 1.2 cm，燃料棒外直徑從 1.2 cm 到 1.4 cm，燃料棒間距從 1.64 cm 到 2.54 cm，水鈾體積比從 1.6 到 3.8。

為了真實反應臨界實驗的設置，在建立 MCNP 的三維輸入檔時，已儘可能完全依據文獻上提供的幾何形狀尺寸與材料密度組成來模擬。每組

模擬 MCNP 都追蹤 5,250,000 顆射源中子，即 1,050 個週期（cycle），每週期 5,000 個粒子，並忽略前 50 個週期的歷史。

3. 驗證計算結果

表 6.1.4-1 與表 6.1.4-2 列出了所有標準臨界實驗驗證計算的 k_{eff} 值，圖 6.1.4-1 為其分佈圖[11]。138 個 k_{eff} 值，扣除 5 個大於 1 者，剩下 133 個的平均 k_{eff} 值與標準偏差為 0.99491 ± 0.00254 ，平均蒙地卡羅誤差為 ± 0.00032 。因為 MCNP 是以三維的方式模擬並沒有做任何均質化，材料的組成與密度也完全依據參考文獻上表列的數據，因此將 Δk_c 中受限於計算方法而造成在幾何與材料上的模擬誤差設為 0.0；另外，在模擬時，完全是依據臨界實驗的燃料種類、濃縮度、中子吸收物/板的設置、 ^{10}B 的含量和反射體尺寸與材質等系統參數來模擬，所以並沒有必要對臨界實驗的系統參數外插 k_c 的需要；因此，將 Δk_c 中對臨界實驗的系統參數外插 k_c 時所得的誤差設為 0.0。

依據 B&W[3]和 VCML[10]臨界實驗關於臨界高度的誤差，臨界實驗的實驗誤差可以保守地設為 ± 0.001 。

因此，程式計算與臨界條件差異的平均，即平均偏差值 β 為 $1 - 0.99491 = 0.00509$ ，而該平均偏差值的不準度（考慮程式計算的統計誤差與蒙地卡羅誤差和臨界實驗的實驗誤差）為

$(0.0025^2 - 0.00032^2 + 0.001^2)^{1/2} = 0.00271$ ，以 $n = 133$ 、 $\gamma = 0.95$ 、 $p = 0.95$ ，查表得單側容忍因子（one-side tolerance factor）為 1.885；所以， $\Delta\beta = 0.00271 \times 1.885 = 0.00511$ ，將 β 與 $\Delta\beta$ 代入(9)式得到：

$$k_s = k_{eff} + \Delta k_s + 0.00509 + 0.00511 \leq 0.95 \quad (10)$$

其中與 Δk_s 與 $\Delta\beta$ 要以統計的規則來結合。

由於在後續的護箱臨界分析時，會假定最保守的材料和製造容許差異限度來計算 k_s （例如中子吸收物的 ^{10}B 含量降為 75%，護箱內的燃料束與提籃的組成元件是處於反應度最大的設置方式等）；因此，將 Δk_s 中材料和製造的容許差異限度造成的誤差設為 0.0；另外，因為 MCNP 是以三維的方式模擬並沒有做任何均質化，材料的組成與密度也完全依據護箱設

計規格上表列的數據，因此，將 Δk_s 中受限於計算方法而造成在幾何與材料上的模擬誤差設為 0.0。所以， Δk_s 中只剩下 k_s 的蒙地卡羅誤差 σ_{k_s} ，依據統計規則結合 $\Delta\beta$ 與 σ_{k_s} ，(10)式可再改寫為：

$$k_s = k_{eff} + 0.00509 + \sqrt{0.00511^2 + (2\sigma_{keff})^2} \leq 0.95 \quad (11)$$

(11)式即是護箱臨界評估所用的次臨界安全基準。

4. k_{eff} 值與主要系統參數的相關性分析

依據 NUREG-1536 第 7.5.4.3 節與 NUREG-1567 第 8.4.4.3 節的要求，分析驗證計算的 k_{eff} 值與主要系統參數的相關性。圖 6.1.4-2 至圖 6.1.4-5 分別為驗證計算的 k_{eff} 值對 ^{235}U 濃縮度、燃料棒間距、水鈾體積比與 Boral ^{10}B 面密度之散佈圖，圖上還有線性迴歸分析之迴歸線與相關係數(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 0.3630，最小為 0.2107，因此並沒有統計上顯著的相關趨勢。也因為這個結果，才能用 95 信心/95 機率的單側容忍因子 (one-side tolerance factor) 原則來規範 β 的不準度。

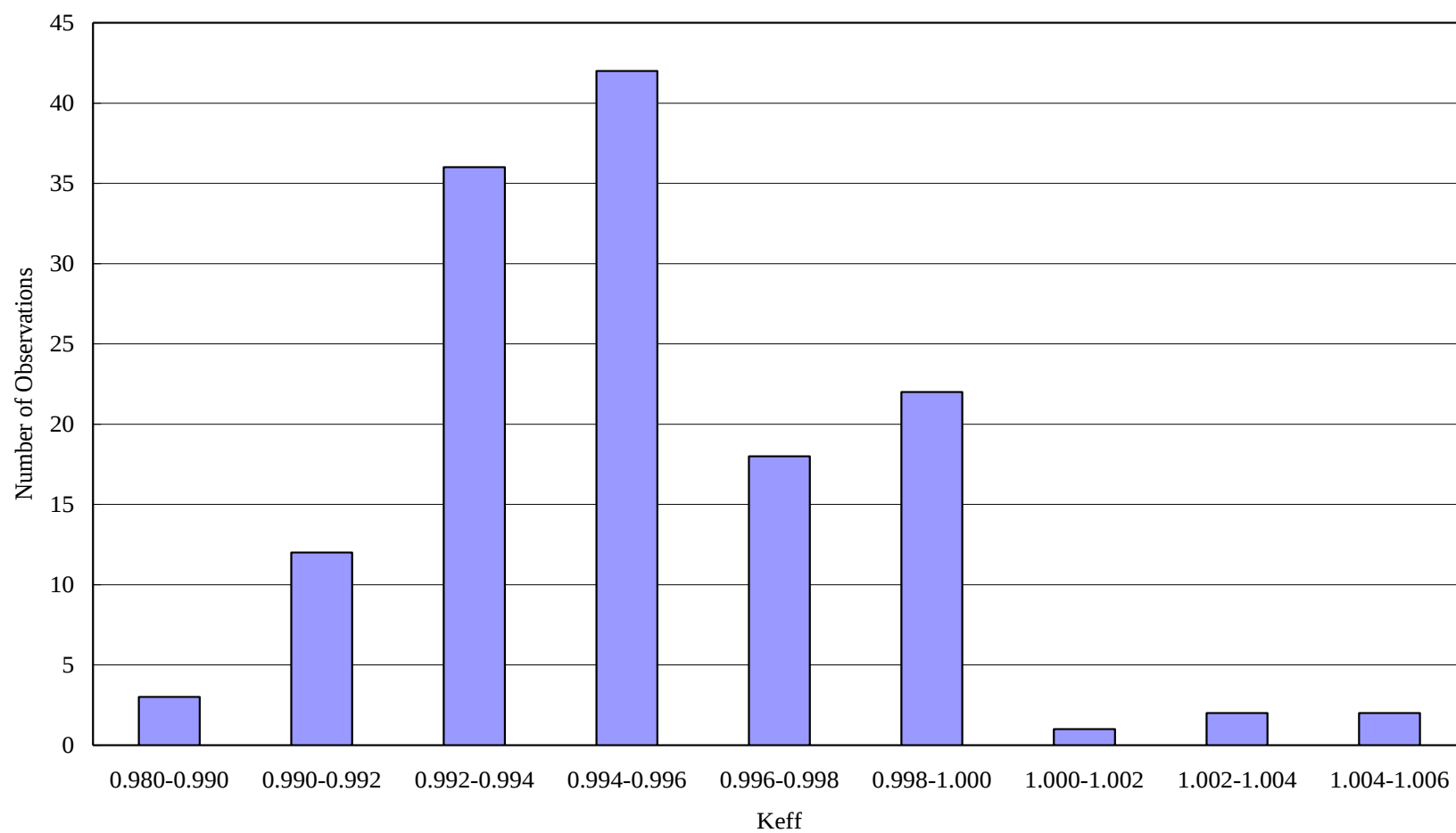


圖 6.1.4-1 驗證計算所得 k_{eff} 值分佈圖

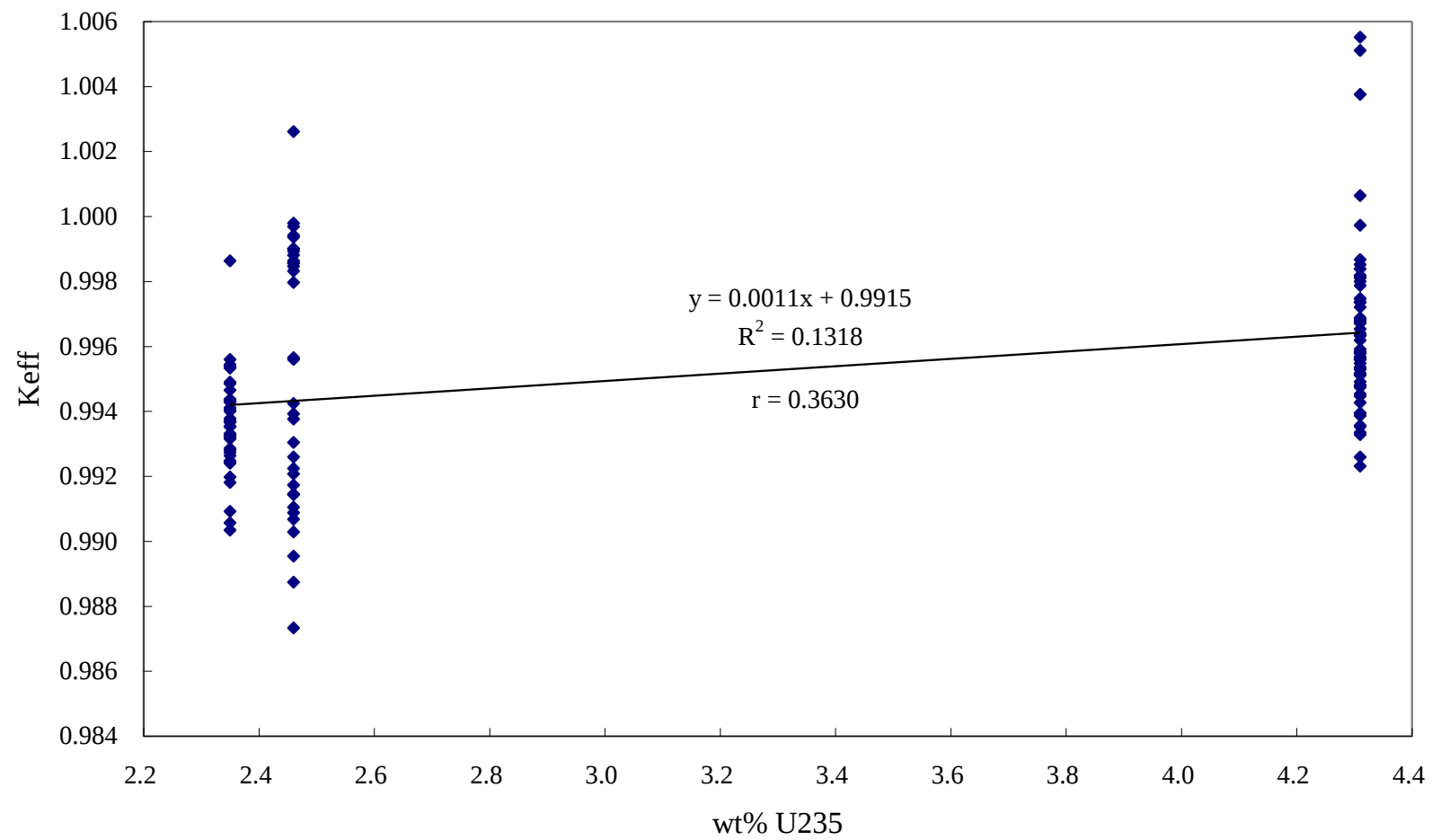


圖 6.1.4-2 驗證計算所得 k_{eff} 值對濃縮度之散佈圖

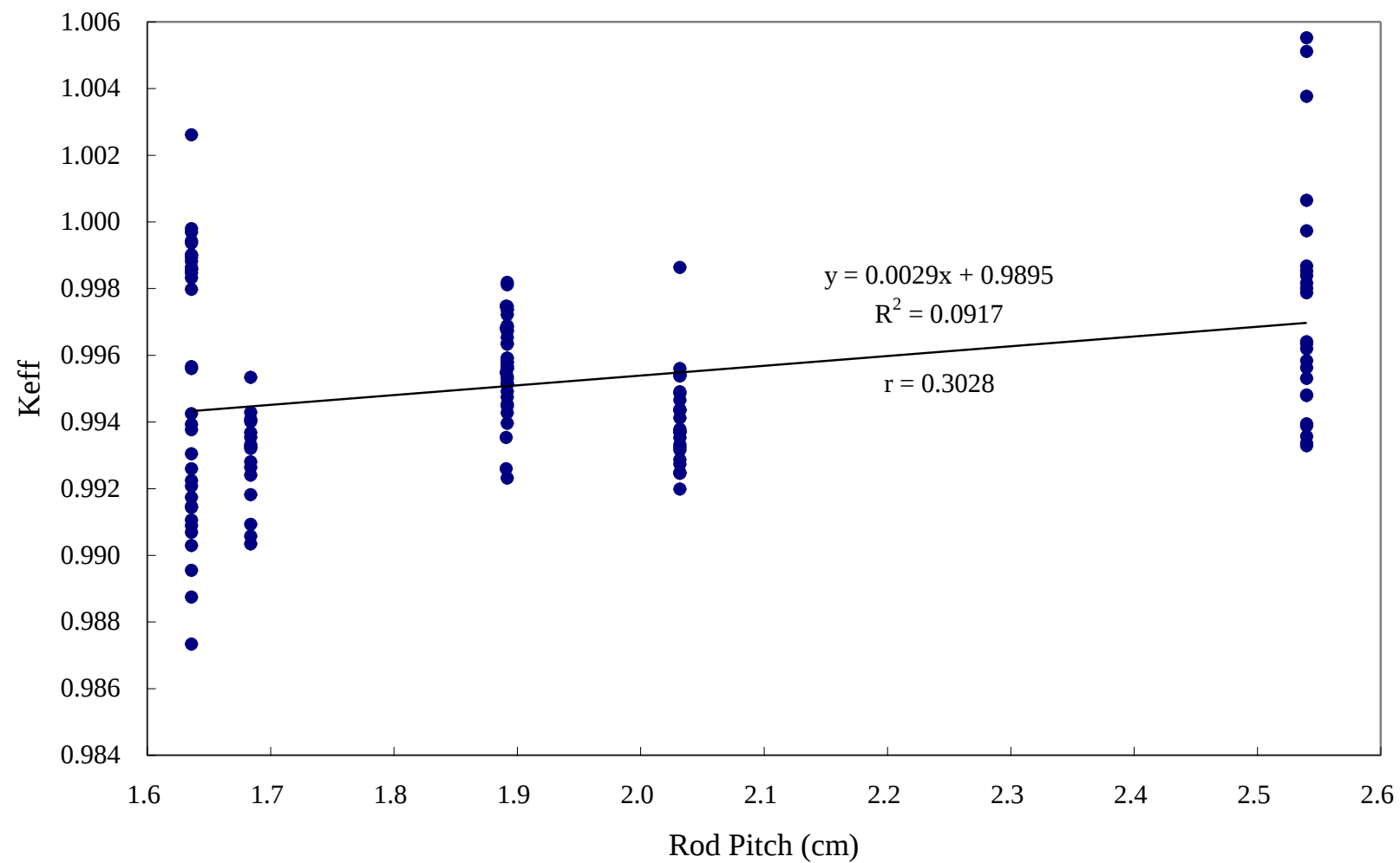


圖 6.1.4-3 驗證計算所得 k_{eff} 值對燃料棒間距之散佈圖

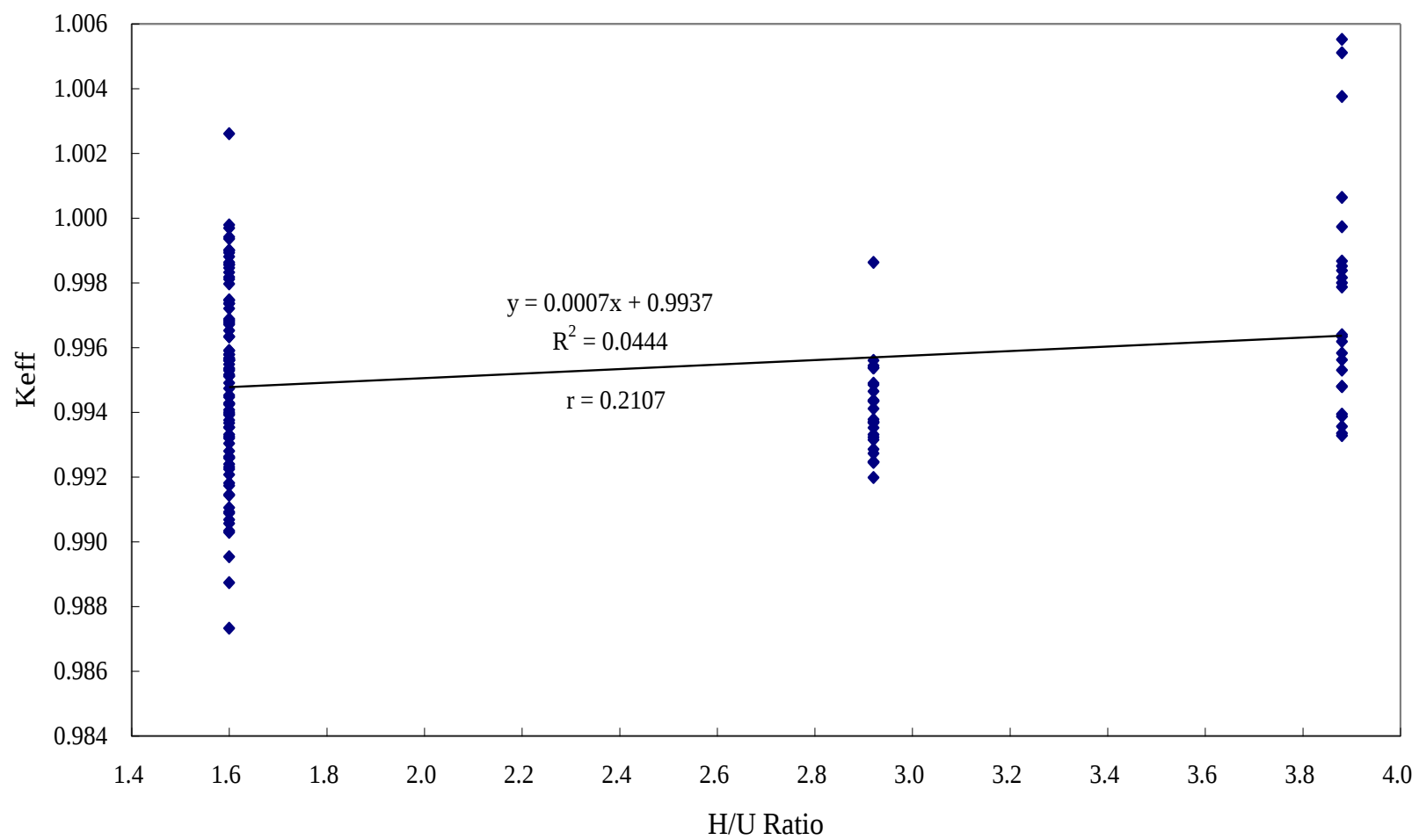


圖 6.1.4-4 驗證計算所得 k_{eff} 值對水鈾體積比之散佈圖

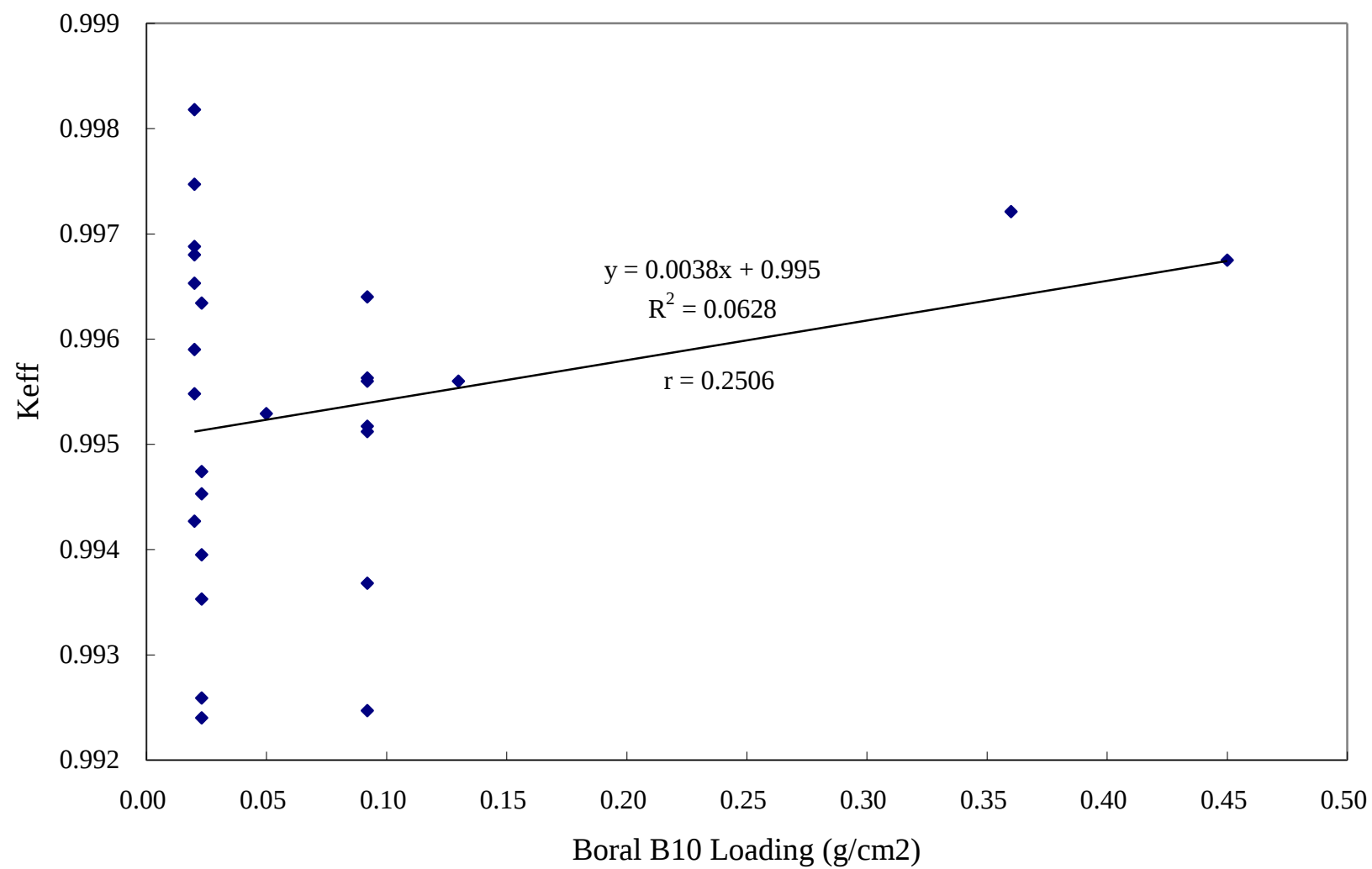


圖 6.1.4-5 驗證計算所得 k_{eff} 值對 Boral ¹⁰B 面密度之散佈圖

表 6.1.4-1 B&W 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽

B&W 臨界實驗	設置	濃縮度 wt% ²³⁵ U	燃料棒 間距 (cm)	燃料丸 直徑 (cm)	護套外 直徑 (cm)	水鈾 體積 比	溶解硼 濃度 (ppm)	中子吸收物	叢集間距 (cm)	MCNP 5	
										k _{eff}	σ(mk)
I	Cylindrical	2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	0	NA	0	0.99392	0.31
II	3x3-14 x 14	2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	1037	NA	0	0.99969	0.30
III_1		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	769	NA	1.636	0.99797	0.31
III_2		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	764	NA	1.636	0.99893	0.30
III_3		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	762	NA	1.636	0.99881	0.31
III_4		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	753	NA	1.636	0.99846	0.30
III_5		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	739	NA	1.636	1.00261	0.32
III_6		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	721	NA	1.636	0.99856	0.30
III_7		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	702	NA	1.636	0.99832	0.31
IV		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	0	84 B4C pins	1.636	0.99173	0.30
V		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	0	64 B4C pins	3.272	0.99105	0.30
VI		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	0	64 B4C pins	3.272	0.99088	0.31
VII		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	0	34 B4C pins	4.908	0.99146	0.30
VIII		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	0	34 B4C pins	4.908	0.99068	0.29
IX		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	0	NA	6.543	0.99029	0.30

表 6.1.4-1B&W 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽（續）

B&W 臨界實驗	設置	濃縮度	燃料棒	燃料丸	護套外	水鉬	溶解硼	中子吸收物	叢集間距 (cm)	MCNP 5	
		wt% ²³⁵ U	間距 (cm)	直徑 (cm)	直徑 (cm)	體積 比	濃度 (ppm)			k _{eff}	σ(mk)
X	3x3-14 x 14	2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	143	NA	4.908	0.99227	0.28
XI_1		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	510	steel	1.636	0.99901	0.29
XI_2		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	514	steel	1.636	0.99936	0.30
XI_3		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	501	steel	1.636	0.99942	0.30
XI_4		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	493	steel	1.636	0.99900	0.30
XI_5		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	474	steel	1.636	0.99857	0.30
XI_6		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	462	steel	1.636	0.99863	0.31
XI_7		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	432	steel	1.636	0.99979	0.29
XII		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	217	steel	3.272	0.99565	0.30
XIII		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	15	B-Al Set 5	1.636	0.99580	0.31
XIIIa		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	28	B-Al Set 5a	1.636	0.99376	0.32
XIV		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	92	B-Al Set 4	1.636	0.99304	0.31
XV		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	395	B-Al Set 3	1.636	0.98874	0.31
XVI		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	121	B-Al Set 3	3.272	0.98733	0.30
XVII		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	487	B-Al Set 2	1.636	0.99259	0.31
XVIII		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	197	B-Al Set 2	3.272	0.99143	0.31
XIX		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	634	B-Al Set 1	1.636	0.99424	0.30
XX		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	320	B-Al Set 1	3.272	0.99224	0.29
XXI		2.46	1.636	1.03	1.206	1.6	72	B-Al Set 1	4.908	0.98954	0.30

表 6.1.4-2 PNL 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽

B&W 臨界實驗	設置	濃縮度	燃料棒	燃料丸	護套外	水鈾	中子吸收物	叢集間距 (cm)	MCNP 5	
		wt% ²³⁵ U	間距 (cm)	直徑 (cm)	直徑 (cm)	體積 比			k _{eff}	σ(mk)
W235wl01	3-20 x 17 water Reflector	2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	11.92	0.99378	0.30
W235wlSS01		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	steel.	10.44	0.99331	0.29
W235wlSS02		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	steel	11.47	0.99323	0.30
W235wlSS03		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	borated steel	7.56	0.99352	0.30
W235wlSS04		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	borated steel	9.62	0.99369	0.29
W235wlSS05		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	borated steel	7.36	0.99315	0.29
W235wlSS06		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	borated steel	9.52	0.99434	0.29
W235wlBoral01		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	Boral A	6.34	0.99247	0.30
W235wlBoral02		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	Boral A	9.03	0.99368	0.28
W431wl01	3-15 x 8 water Reflector	4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	10.62	0.99852	0.33
W431wlSS01		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	S.S.	8.58	0.99530	0.33
W431wlSS02		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	S.S.	9.65	0.99479	0.34
W431wlSS03		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	borated steel	6.1	0.99619	0.34
W431wlSS04		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	borated steel	8.08	0.99583	0.33
W431wlSS05		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	borated steel	5.76	0.99634	0.33
W431wlSS06		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	borated steel	7.9	0.99562	0.33
W431wlBoral01		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	Boral A	6.72	0.99640	0.33

表 6.1.4-2 PNL 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽（續）

PNL 臨界實驗	設置	濃縮度 wt% ²³⁵ U	燃料棒 間距 (cm)	燃料丸 直徑 (cm)	護套外 直徑 (cm)	水鈾 體積 比	中子吸 收物	叢集間距 (cm)	叢集和反射 牆間距 (cm)	MCNP 5	
										k _{eff}	σ(mk)
U235wl01	3-19 x 16 Depleted U. Reflector	2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	11.83	0.0	0.99435	0.28
U235wl02		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	13.93	1.321	0.99485	0.28
U235wl03		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	14.11	1.956	0.99537	0.28
U235wl04		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	13.70	2.616	0.99560	0.29
U235wl05		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	10.69	5.405	0.99286	0.27
U235wl06		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	8.56	10.676	0.99245	0.29
U235wl07		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	8.31	16	0.99273	0.28
U431wl01	3-12 x 8 Depleted U. Reflector	4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	15.38	0.0	0.99787	0.31
U431wl02		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	15.32	1.956	0.99816	0.31
U431wl03		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	18.05	3.912	0.99867	0.31
U431wl04		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	13.49	5.405	0.99480	0.32
U431wl05		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	8.24	16	0.99356	0.31

表 6.1.4-2 PNL 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽（續）

PNL 臨界實驗	設置	濃縮度 wt% ²³⁵ U	燃料棒 間距 (cm)	燃料丸 直徑 (cm)	護套外 直徑 (cm)	水鈾 體積 比	中子吸 收物	叢集間距 (cm)	叢集和反射 牆間距 (cm)	MCNP 5	
										k _{eff}	σ(mk)
L235wl01	3-19 x 16 Pb Reflector	2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	13.84	0.0	0.99437	0.28
L235wl02		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	13.72	0.66	0.99863	0.29
L235wl03		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	11.25	2.616	0.99544	0.29
L235wl04		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	8.31	16	0.99198	0.29
L431wl01	3-13 x 8 Pb Reflector	4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	20.62	0.0	1.00552	0.32
L431wl02		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	20.78	0.66	1.00511	0.33
L431wl03		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	19.04	1.321	1.00376	0.33
L431wl04		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	10.30	5.405	0.99328	0.33
L431wl05		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	8.24	16	0.99335	0.34

表 6.1.4-2 PNL 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽（續）

PNL 臨界實驗	設置	濃縮度 wt% ²³⁵ U	燃料棒 間距 (cm)	燃料丸 直徑 (cm)	護套外 直徑 (cm)	水鈾 體積 比	中子吸 收物	叢集間距 (cm)	叢集和反射 牆間距 (cm)	MCNP 5	
										k _{eff}	σ(mk)
S235wl01	3-19 x 16 St. Refl.	2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	10.65	0.0	0.99538	0.28
S235wl02		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	11.20	0.66	0.99490	0.30
S235wl03		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	11.20	1.321	0.99411	0.29
S235wl04		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	10.36	2.616	0.99465	0.28
S235wl05		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	9.51	3.912	0.99371	0.29
S235wl06		2.35	2.032	1.1176	1.27	2.92	NA	8.23	16.0	0.99246	0.28
S235ws01	1-25 x 18 2-20 x 18 St. Refl.	2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	NA	8.98	0.0	0.99263	0.31
S235ws02		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	NA	9.58	0.66	0.99280	0.31
S235ws03		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	NA	9.51	1.321	0.99428	0.31
S235ws04		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	NA	9.66	1.684	0.99325	0.31
S235ws05		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	NA	9.28	2.344	0.99354	0.30
S235ws06		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	NA	9.06	3.005	0.99181	0.31
S235ws07		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	NA	8.54	3.912	0.99092	0.31
S235ws08		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	NA	7.67	6.726	0.99057	0.30
S235ws09		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	NA	7.19	15.0	0.99034	0.30

表 6.1.4-2 PNL 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽（續）

PNL 臨界實驗	設置	濃縮度	燃料棒	燃料丸	護套外	水鈾	中子吸	叢集間距	叢集和反射	MCNP 5	
		wt% ²³⁵ U	間距 (cm)	直徑 (cm)	直徑 (cm)	體積 比	收物	(cm)	牆間距 (cm)	k _{eff}	σ(mk)
S431wl01	3-13 x 8 Steel Reflector	4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	12.89	0.0	1.00064	0.33
S431wl02		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	14.25	0.66	0.99973	0.34
S431wl03		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	14.12	1.321	0.99838	0.33
S431wl04		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	12.44	2.616	0.99800	0.34
S431wl05		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	9.8	5.405	0.99394	0.32
S431wl06		4.31	2.54	1.2649	1.4147	3.88	NA	8.24	16.0	0.99387	0.34
S431ws01	3-12 x 16 St. Refl.	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	NA	14.87	0.0	0.99684	0.34
S431ws02		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	NA	15.74	0.66	0.99736	0.35
S431ws03		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	NA	15.87	1.321	0.99746	0.35
S431ws04		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	NA	15.84	1.956	0.99671	0.36
S431ws05		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	NA	15.45	2.616	0.99591	0.34
S431ws06		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	NA	13.82	5.405	0.99568	0.33
S431ws07		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	NA	12.75	16.0	0.99578	0.35

表 6.1.4-2 PNL 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽（續）

PNL 臨界實驗	設置	濃縮度 wt% ²³⁵ U	燃料棒 間距 (cm)	燃料丸 直徑 (cm)	護套外 直徑 (cm)	水鈾 體積 比	中子吸收物	叢集間距 (cm)	叢集和反射 牆間距 (cm)	MCNP 5	
										k _{eff}	σ(mk)
S431wsa01	3-12 x 16 St. Refl.	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	S.S.	13.75	1.956	0.99491	0.36
S431wsa02		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	borated steel	9.83	1.956	0.99633	0.34
S431wsa03		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral B	8.3	1.956	0.99474	0.35
S431wsa04		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boroflex	8.37	1.956	0.99736	0.35
S431wsa05		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Cadmium	8.94	1.956	0.99579	0.35
S431wsa06		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Copper	13.47	1.956	0.99536	0.34
S431wsa07		4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Copper + Cadmium	10.57	1.956	0.99447	0.35
S235wsa01	1-25 x 18 2-20 x 18 St. Refl.	2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	S.S.	8.28	1.321	0.99320	0.30
S235wsa02		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	borated steel	4.8	1.321	0.99367	0.31
S235wsa03		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	Boral B	2.69	1.321	0.99240	0.31
S235wsa04		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	Boroflex	2.98	1.321	0.99533	0.32
S235wsa05		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	Cadmium	3.86	1.321	0.99407	0.30
S235wsa06		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	Copper	7.79	1.321	0.99400	0.31
S235wsa07		2.35	1.684	1.1176	1.27	1.6	Copper + Cadmium	5.43	1.321	0.99331	0.32

表 6.1.4-2 PNL 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽（續）

PNL 臨界實驗	設置	濃縮度 wt% ²³⁵ U	燃料棒 間距 (cm)	燃料丸 直徑 (cm)	護套外 直徑 (cm)	水鈾 體積 比	中子吸 收物	¹⁰ B 面密 度(g/cm ²)	叢集間距 (cm)	MCNP 5	
										K _{eff}	σ(mk)
PNL-127	2x1 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-C	0.020	0.64	0.99818	0.34
PNL-126	2x1 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-C	0.020	1.54	0.99688	0.34
PNL-123	2x1 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-C	0.020	3.80	0.99653	0.35
PNL-125	2x1 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-C	0.020	5.16	0.99427	0.36
PNL-124	2x1 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-C	0.020	infinity	0.99590	0.35
PNL-123-S	2x1 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Steel	0	3.80	0.99231	0.34
PNL-124-S	2x1 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Steel	0	infinity	0.99512	0.36

表 6.1.4-2 PNL 臨界實驗 MCNP5 驗證計算結果一覽（續）

PNL 臨界實驗	設置	濃縮度 wt% ²³⁵ U	燃料棒 間距 (cm)	燃料丸 直徑 (cm)	護套外 直徑 (cm)	水鈾 體積 比	中子吸 收物	¹⁰ B 面密 度(g/cm ²)	中子吸收物 間距 (cm)		MCNP 5	
									Xc	Yc	K _{eff}	σ(mk)
PNL-079	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-A	0.092	2.83	2.83	0.99512	0.34
PNL-080	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-A	0.092	2.83	4.80	0.99563	0.35
PNL-082	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-A	0.092	2.83	8.50	0.99517	0.35
PNL-081	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-A	0.092	2.83	10.39	0.99560	0.35
PNL-087	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-B	0.023	2.83	2.83	0.99453	0.34
PNL-088	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-B	0.023	2.83	3.17	0.99634	0.34
PNL-089	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-B	0.023	2.83	4.72	0.99395	0.35
PNL-086	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-B	0.023	2.83	5.24	0.99259	0.34
PNL-090	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-B	0.023	2.83	8.50	0.99353	0.36
PNL-093	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-C	0.020	2.83	2.83	0.99747	0.34
PNL-092	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-C	0.020	2.83	3.53	0.99548	0.36
PNL-091	2x2 Flux Trap	4.31	1.892	1.2649	1.4147	1.6	Boral-C	0.020	2.83	8.50	0.99680	0.37
PNL-229	2x2 Flux Trap	4.31	1.891	1.265	1.415	1.6	6061-Al	0	W = 3.81		0.99811	0.33
PNL-230	2x2 Flux Trap	4.31	1.891	1.265	1.415	1.6	Boral	0.05	W = 3.75		0.99529	0.35
PNL-228	2x2 Flux Trap	4.31	1.891	1.265	1.415	1.6	Boral	0.13	W = 3.73		0.99560	0.36
PNL-214	2x2 Flux Trap	4.31	1.891	1.265	1.415	1.6	Boral	0.36	W = 3.73		0.99721	0.37
PNL-231	2x2 Flux Trap	4.31	1.891	1.265	1.415	1.6	Boral	0.45	W = 3.71		0.99675	0.36

(五) 分析結果

本報告所評估的護箱分別為經本計畫改良之傳送護箱和 NAC 原設計的混凝土護箱；在模擬時，各個主要結構組件的尺寸以工程圖上所標示的尺寸為主。而所評估的核子燃料，為核一廠的用過核子燃料，除了分析本計畫所需之燃料型式外，亦涵蓋 ATRIUM™-10 燃料的誤裝填情況包括在內。

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，其背後運作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[12]。

1. 決定設計基準燃料

針對 GE8x8-1、GE8x8-2、GE9B 與 SPC8×8 這四種型式的核子燃料，表 6.1.5-1 為傳送護箱臨界分析的計算結果，表 6.1.5-2 為混凝土護箱臨界分析的計算結果。這四種燃料的濃縮度皆設定為 4.0 wt% ^{235}U ，燃料密度皆設定為 10.45 g/cm^3 。傳送護箱和混凝土護箱兩者的計算結果皆顯示，以 GE9B 燃料的反應度最大，因此，確定 GE9B 為設計基準燃料，每束燃料束有 60 根燃料棒，正中央有一根佔據 4 個棒位的水棒，燃料濃縮度為 4.0 wt% ^{235}U ，燃料密度為 10.45 g/cm^3 。

2. 決定提籃結構中段的代表性區域

表 6.1.5-3 為兩組提籃結構中段代表區域臨界分析的計算結果，一組為導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落，另一組為承載圓盤-間隙所構成的段落。傳送護箱和混凝土護箱兩者的計算結果皆顯示，以導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落較保守。該計算所使用之燃料為設計基準燃料。

另外，表 6.1.5-3 亦列出了圓盤開口中心對中心的距離變化對反應度的影響，傳送護箱和混凝土護箱兩者的計算結果皆顯示，以距離較小者較保守。

因此護箱的計算機程式模式在提籃結構的中段代表性區域，確定為導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落；圓盤開口中心對中心的距離確定為 17.5763 cm。

探究其原因，提籃結構中段代表性區域，導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落，會比承載圓盤-間隙所構成的段落保守，是因為當這些間隙充滿水之後，會開始產生將核分裂產生之快中子予以熱中子化的效應，水愈多者，熱中子化效果愈好，本來應該 k 值會上升，但是因為在燃料管的周圍有中子吸收物（除了排列在最外圍的燃料管以外，其它的每束燃料管於構成右上角之兩面外皆有中子吸收物）， ^{10}B 會把熱中子吸收掉，所以反而造成 k 值下降。

3. 均勻化與非均勻化濃縮度燃料束反應度評估

由於 BWR 的燃料束其濃縮度在軸向與徑向並不是均勻的，為了更保守並減輕在後續計算時模擬各個不同濃縮度分佈的困擾，在前兩節的分析皆假定使用均勻濃縮度，即將初始軸向最高面平均（peak-planar-average）濃縮度提高到 4.0 wt% ^{235}U 。本節以設計基準燃料 GE9B 為分析主體，確認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。

表 6.1.5-4 為傳送護箱臨界分析的計算結果，表 6.1.5-5 為混凝土護箱臨界分析的計算結果。傳送護箱和混凝土護箱兩者的計算結果皆顯示，使用初始軸向最高面平均濃縮度 3.69 wt% ^{235}U ，比使用真實濃縮度分佈的燃料束更保守；而將此均勻濃縮度再提高至 4.0 wt% ^{235}U ，又比使用均勻濃縮度 3.69 wt% ^{235}U 的燃料束來的更保守。因此，濃縮度 4.0 wt% ^{235}U 的設計基準燃料，已可涵蓋 GE8x8-1、GE8x8-2、GE9B 與 SPC8x8 這四種型式的核子燃料。

該計算使用燃料束名稱 GE9B-P8CWB330-10GZ1-100U-1590-T 所屬燃料晶格名稱 P8CWL369-2G5.0/6G4.0-100U-T 之濃縮度分佈，不含 Gd_2O_3 。

4. 提籃結構機械性偏移與幾何尺寸製造公差對反應度的影響

要考慮的因素包括：

- (1) 方形燃料管開口的尺寸變化，燃料管內寬(inner width)的製造公差為： ± 0.051 cm，燃料管開口的外寬、中子吸收板及其外殼之尺寸，將伴隨內寬調整。
- (2) 承載圓盤和導熱圓盤其方形開口的尺寸變化，圓盤開口內寬的製造公差為： ± 0.038 cm。
- (3) 承載圓盤和導熱圓盤其方形開口在提籃內的位置變化（即排列的較緊密或較鬆散），圓盤開口中心對中心距離的製造公差為：提籃直徑常態值 ± 0.038 cm（換算為 x 和 y 方向約為 ± 0.027 cm）。
- (4) 燃料束（含燃料匣）在方形燃料管內的移動，移動方向計有：徑向朝內、徑向朝外、左、右、上、下和提籃的四個角落等 10 個方向。
- (5) 燃料管在承載圓盤和導熱圓盤所構成的方形通道內的移動，移動方向計有：徑向朝內、徑向朝外、左、右、上、下和提籃的四個角落等 10 個方向。

第(1)~(3)項為評估提籃結構主要構件的製造公差對反應度的影響，第(4)和(5)項為評估提籃結構主要構件的移動對反應度的影響，圖 6.1.5-1 為此 10 個移動方向的示意圖。表 6.1.5-6 為傳送護箱臨界分析的計算結果，表 6.1.5-7 為混凝土護箱臨界分析的計算結果。各表所列第一組計算結果為標準參考值，其計算的條件是：第(1)~(3)項採用常態值，第(4)項燃料束置於燃料管的正中央，第(5)項燃料管置於圓盤開口的正中央。在分析第(1)~(3)項時，第(4)和(5)項皆是維持置中的設定不變；分析第(1)項時，第(2)和(3)項採用常態值；分析第(2)項時，第(1)和(3)項採用常態值；分析第(3)項時，第(1)和(2)項採用常態值。在分析第(4)和(5)項時，第(1)~(3)項皆維持採用常態值；分析第(4)項時，第(5)項是維持置中的設定；分析第(5)項時，第(4)項是維持置中的設定。這樣每一組計算結果都可以和標準參考值比較，而得知單一變因所造成的影響。

關於第(1)~(3)項製造公差對反應度的影響，傳送護箱和混凝土護箱兩者的計算結果顯示，在 ± 1.8 mk 以內，以第(3)項的反應度變化最明顯。關於主要構件的移動對反應度的影響，傳送護箱和混凝土護箱兩者的計算結果，顯示第(4)項燃料束的移動對反應度的影響在 -18.6 mk ~ 12.5 mk 之間，其中以右上角、徑向朝外和徑向朝內這三個方向的反應度變化皆大於 10 mk；第(5)項燃料管的移動對反應度的影響在 -6.3 mk ~ 5.2 mk 之間，以徑向朝外和徑向朝內這兩個方向的反應度變化最明顯。

由傳送護箱和混凝土護箱兩者第(4)和(5)項的計算結果可以發現，燃料束與燃料管往徑向朝內移動所得到的正反應度都是最大的；因此，各表最後一組計算結果，即為燃料束與燃料管兩者同時往徑向朝內移動，所得反應度變化在 17 mk 左右，是製造公差對反應度影響的 9 倍；因此，最後確定以燃料束與燃料管兩者同時往徑向朝內移動，作為提籃內部主要構件反應度最大的設置方式（most reactive configuration），不計製造公差對反應度影響。此一結論也與 NAC 的結論一致[2]。

另外，亦針對燃料束晶格尺寸的製造公差進行靈敏度分析，分析的項目包括：

- 燃料丸直徑 (± 0.001 cm)
- 護套內徑 (± 0.004 cm)
- 護套外徑 (± 0.004 cm)
- 水棒厚度 (± 0.015 cm)
- 燃料匣厚度 (± 0.02 cm)

分析結果顯示，將各項正反應度合併（平方相加開根號）後，所得之 Δk 為 2 mk，由於該值比燃料束和燃料管兩者同時往徑向朝內移動所得的反應度變化小很多，因此忽略不計。

5. 護箱在正常、異常與事故情況的臨界分析

說明正常、異常與事故情況的定義。對於傳送護箱：

- 正常情況 - 密封鋼筒內和外乾溼皆可，但護套間隙 (fuel-to-clad gap) 是乾的；
- 事故情況 - 密封鋼筒內和外是溼的，且護套間隙注滿密度為 1.0 g/cm^3 的水。

因為傳送護箱在正常的操作過程中密封鋼筒內和外本來就有注水和洩水的過程，因此沒有異常情況。

對於混凝土護箱：

- 正常情況 - 密封鋼筒內、外和護套間隙都是乾的；
- 異常情況 - 密封鋼筒內和護套間隙是乾的，密封鋼筒外是溼的；
- 事故情況 - 密封鋼筒內和外是溼的，且護套間隙注滿密度為 1.0 g/cm^3 的水。

表 6.1.5-8 為正常情況下傳送護箱臨界分析的計算結果，表 6.1.5-9 為事故情況下傳送護箱臨界分析的計算結果，表 6.1.5-10 為正常和異常情況下混凝土護箱臨界分析的計算結果，表 6.1.5-11 為事故情況下混凝土護箱臨界分析的計算結果。

對於傳送護箱，由表 6.1.5-8 可知在正常情況下，包括程式偏差值與所有不準度的最大 k_{eff} 值為 0.91540；由表 6.1.5-9 可知在事故情況下，包括程式偏差值與所有不準度的最大 k_{eff} 值為 0.91895。

對於混凝土護箱，由表 6.1.5-10 可知在正常情況下，包括程式偏差值與所有不準度的最大 k_{eff} 值為 0.36507；在異常情況下，包括程式偏差值與所有不準度的最大 k_{eff} 值為 0.37491；由表 6.1.5-11 可知在事故情況下，包括程式偏差值與所有不準度的最大 k_{eff} 值為 0.91877。

另外，結構分析的結果顯示考慮最嚴重的護箱傾倒事故情況，燃料束和燃料管都不會發生永久變形，且中子吸收板也不會脫離燃料管，只會造成燃料束和燃料管都往傾倒的方向偏移。表 6.1.5-8 ~ 11 的計算結果皆是以燃料束和燃料管同時徑向朝內偏移的設置方式來計算，此反應度最大

的設置方式已涵蓋燃料束和燃料管都往單一方向偏移所造成的反應度變化，因此不需要再對護箱傾倒事故情況另外進行分析。

因此，裝載 56 束反應度最強的設計基準燃料束，提籃內部設置為反應度最強的設置方式，於最嚴重的事故情況下，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，都能滿足法規對於 k_{eff} 值要小於或等於 0.95 的規定。

觀察密封鋼筒內和外的水密度變化與 k_{eff} 值的關係，可以發現 k_{eff} 值會隨者密封筒內水密度的增加而變大，無論密封鋼筒外的水密度是隨著密封鋼筒內的水密度同步增加，或是固定在一個定值，無論護套間隙是否充滿水。由此可知密封鋼筒內的水密度，對於護箱的 k_{eff} 值大小是最主要的決定因素。

觀察表 6.1.5-10 混凝土護箱在正常與異常情況下的計算結果，當密封筒內水密度固定在 0.0001 g/cm^3 ，密封鋼筒外的水密度由 0.0001 g/cm^3 ，開始增加至 1.0 g/cm^3 ， k_{eff} 值呈現先升後降的趨勢，且混凝土護箱在密封鋼筒外的導熱環型空隙注滿水的情況下，其 k_{eff} 值低於在完全乾燥情況下(即正常情況下)的 k_{eff} 值，這是因為當密封鋼筒外的導熱環型空隙內水的密度逐漸增加時，其吸收效應會逐漸超過散射效應(熱中子化效應)。但是這個現象在密封筒內水密度為 1.0 g/cm^3 時，就會變得非常渺小到以致於無法判定這個現象是否還存在(比較傳送護箱在正常和事故情況下密封鋼筒內水密度 = 1.0 g/cm^3 ，密封鋼筒外水密度 = 0.0001 g/cm^3 和 1.0 g/cm^3 的計算結果，和比較混凝土護箱在事故情況下密封鋼筒內水密度 = 1.0 g/cm^3 ，密封鋼筒外水密度 = 0.0001 g/cm^3 和 1.0 g/cm^3 的計算結果，可以發現差異依序只有 -0.68 mk 、 0.35 mk 和 0.86 mk ，已經和蒙地卡羅誤差同一個數量級)。

另外，在傳送護箱密封鋼筒內和外表水密度相同的條件下，比較護套間隙有無充滿水對反應度的影響，可以發現隨者密封鋼筒內和外表水密度的增加，因護套間隙充滿水所增加的反應度從 14 mk 一路減少至 3.2 mk 。

6. 各燃料型式的最大平均初始濃縮度

由前節之結論可知傳送護箱與混凝土護箱，還有餘裕可以裝載濃縮度更高的新燃料。表 6.1.5-12 為最大平均初始濃縮度傳送護箱和混凝土護箱臨界計算的結果，該結果顯示設計基準燃料 GE9B 的濃縮度，可以從 4.0 wt% ^{235}U 再提高至 4.6 wt% ^{235}U ，在提籃內部設置為反應度最強的設置方式，於最嚴重的事故情況下，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都能滿足法規對於 k_{eff} 值要小於或等於 0.95 的規定。

另外，在表 6.1.5-12 中一併附上了 ATRIUMTM-10 燃料束的臨界計算結果。當開始進行用過核子燃料乾式貯存作業時，已有 ATRIUMTM-10 燃料退出至燃料池中。依據 NUREG-1567 第 8.4.1.1 節，關於在分析貯存場的臨界安全時，最少要考慮的情況或事件中，有一項要求為，在護箱裝載卸載操作期間，進出傳送護箱或混凝土護箱要考慮誤裝填的問題。

為此，假定最壞的情況，56 束燃料束全部裝成 ATRIUMTM-10 燃料束，以最高的初始軸向最高面平均（peak-planar-average）濃縮度為 4.562 wt% ^{235}U ，燃料密度設為 10.45 g/cm³（同 GE9B 的燃料密度，實際上 ATRIUMTM-10 的燃料密度只有 10.349 g/cm³），在提籃內部設置為反應度最強的設置方式，於最嚴重的事故情況下，包括程式偏差值與所有不準度，發現其濃縮度可以在 4.562 wt% ^{235}U 的情況下，傳送護箱和混凝土護箱兩者，都還能滿足法規對於 k_{eff} 值要小於或等於 0.95 的規定。

7. 傳送護箱內部水位高度變化和頂部結構對反應度的影響評估

考慮傳送護箱在正常操作程序中有注水和洩水的過程，密封鋼筒內部會有連續的水位高度變化，而在不同的作業階段，其頂部也有四種不同的結構。表 6.1.5-13 列出了傳送護箱在頂部結構只有屏蔽上蓋（開孔未用孔蓋蓋住）的情況下，密封鋼筒內不同水面高度的 k_{eff} 值計算結果，該結果顯示系統的 k_{eff} 值會隨著密封鋼筒內水位高度的增加而增加，在水完全覆蓋有效燃料之後， k_{eff} 值則不再增加。

與第 5 節傳送護箱的意外情況計算結果，比較同樣是最嚴重的事故情況（密封鋼筒內的水密度為 1.0 g/cm^3 ，密封鋼筒外的水密度為 0.0001 g/cm^3 ），可以發現軸向無限延伸徑向無限列陣的三維無限軸向模式的計算結果（ k_{eff} 值 0.90871），會比三維詳細軸向模式的計算結果（ k_{eff} 值 0.90474）來的保守，此結果進一步確認了三維無限軸向模式的保守性和適用性。

而比較護箱頂部 Shl 情況和 Wnc 情況在最嚴重的事故情況下的結果，可知在屏蔽上蓋上方有無增加鉚接屏蔽對系統的 k_{eff} 值幾乎沒有影響。

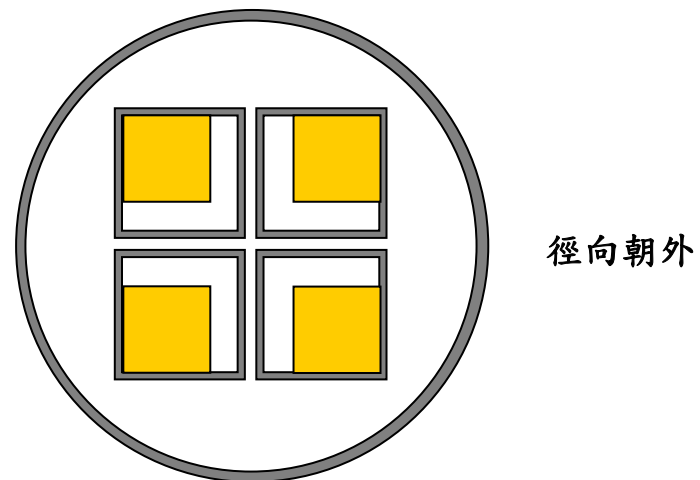
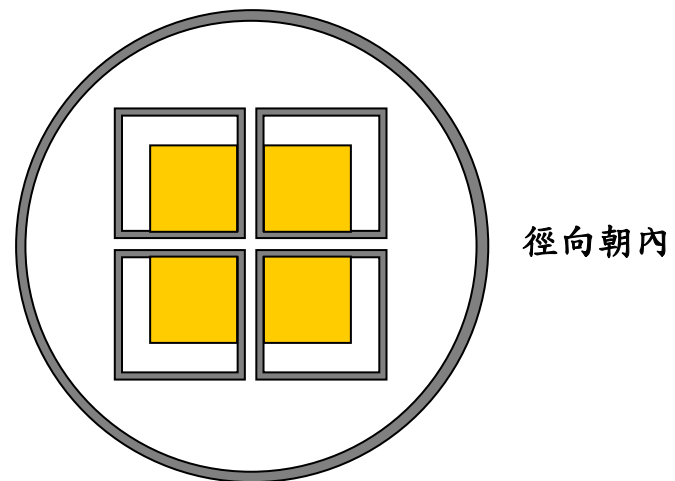
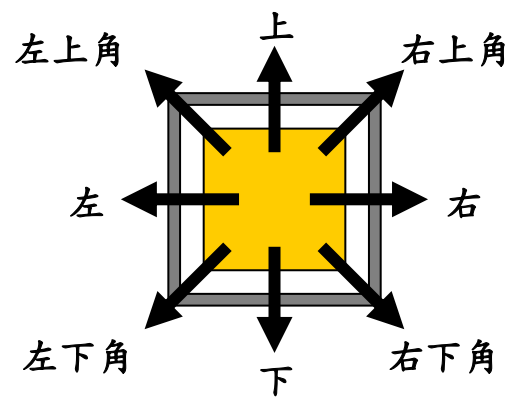


圖 6.1.5-1 燃料束和燃料管機械性偏移方向示意圖

表 6.1.5-1 決定設計基準燃料傳送護箱臨界分析計算結果

燃料型式	棒數		燃料匣厚度 (cm)	護套間隙乾的	
	燃料棒	水棒		k _{eff}	σ
GE8x8-1	63	1	0.254	0.88157	0.00035
GE8x8-2	62	2	0.254	0.88307	0.00034
GE9B	60	1	0.254	0.88772	0.00033
SPC8×8	62	2	0.254	0.88371	0.00033

表 6.1.5-2 決定設計基準燃料混凝土護箱臨界分析計算結果

燃料型式	棒數		燃料匣厚度 (cm)	護套間隙乾的	
	燃料棒	水棒		k _{eff}	σ
GE8x8-1	63	1	0.254	0.88008	0.00034
GE8x8-2	62	2	0.254	0.88309	0.00033
GE9B	60	1	0.254	0.88729	0.00033
SPC8×8	62	2	0.254	0.88367	0.00034

表 6.1.5-3 提籃結構中段代表區域臨界分析計算結果

護箱種類	提籃結構中段代表性區域	圓盤開口中心對中心距離			
		17.5971 cm		17.5763 cm	
		k _{eff}	σ	k _{eff}	σ
傳送護箱	導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落	0.88657	0.00033	0.88772	0.00033
	承載圓盤-間隙所構成的段落	0.87957	0.00034	0.87985	0.00035
混凝土護箱	導熱圓盤-間隙-承載圓盤-間隙所構成的段落	0.88646	0.00034	0.88729	0.00034
	承載圓盤-間隙所構成的段落	0.87885	0.00034	0.87986	0.00034

表 6.1.5-4 均勻化與非均勻化濃縮度傳送護箱臨界分析計算結果

分析案例		濃縮度(wt% ^{235}U)			濃縮度分佈		k_{eff}	σ
陣列	燃料棒數	平均值	最小值	最大值	非均勻.	均勻		
8×8	60	3.69	N/A	N/A		✓	0.87025	0.00033
8×8	60	3.69	2.00	4.90	✓		0.85896	0.00034
8×8	60	4.00	N/A	N/A		✓	0.88772	0.00033

表 6.1.5-5 均勻化與非均勻化濃縮度混凝土護箱臨界分析計算結果

分析案例		濃縮度(wt% ^{235}U)			濃縮度分佈		k_{eff}	σ
陣列	燃料棒數	平均值	最小值	最大值	非均勻.	均勻		
8×8	60	3.69	N/A	N/A		✓	0.87009	0.00034
8×8	60	3.69	2.00	4.90	✓		0.85885	0.00033
8×8	60	4.00	N/A	N/A		✓	0.88729	0.00033

表 6.1.5-6 提籃結構機械性偏移與幾何尺寸製造公差傳送護箱臨界分析計算結果

單項變因分析	k_{eff}	σ	Δk_{eff}
標準參考值	0.88772	0.00033	NA
幾何製造公差			
最小燃料管內寬	0.88676	0.00033	-0.00096
最大燃料管內寬	0.88871	0.00035	0.00099
最小圓盤開口內寬	0.88738	0.00034	-0.00034
最大圓盤開口內寬	0.88680	0.00034	-0.00092
最小圓盤開口間距	0.88771	0.00033	-0.00001
最大圓盤開口間距	0.88636	0.00034	-0.00136
機械性偏移			
燃料束偏移至右上角	0.86909	0.00035	-0.01863
燃料束偏移至上方	0.87812	0.00034	-0.0096
燃料束偏移至左上角	0.88312	0.00034	-0.0046
燃料束偏移至左側	0.89179	0.00035	0.00407
燃料束偏移至左下角	0.89586	0.00033	0.00814
燃料束偏移至下方	0.89164	0.00035	0.00392
燃料束偏移至右下角	0.88264	0.00033	-0.00508
燃料束偏移至右側	0.87868	0.00034	-0.00904
燃料束徑向朝內偏移	0.90009	0.00035	0.01237*
燃料束徑向朝外偏移	0.87265	0.00034	-0.01507
燃料管偏移至右上角	0.88802	0.00034	0.00003
燃料管偏移至上方	0.88778	0.00033	0.00006
燃料管偏移至左上角	0.88687	0.00033	-0.000085
燃料管偏移至左側	0.88623	0.00034	-0.00149
燃料管偏移至左下角	0.88668	0.00033	-0.00104
燃料管偏移至下方	0.88732	0.00036	-0.00004
燃料管偏移至右下角	0.88727	0.00034	-0.00045
燃料管偏移至右側	0.88733	0.00034	-0.00039
燃料管徑向朝內偏移	0.89135	0.00033	0.00363*
燃料管徑向朝外偏移	0.88227	0.00033	-0.00545
結合兩單項變因分析			
燃料束和燃料管同時徑向朝內偏移	0.90516	0.00033	0.01744

*單項變因造成反應度增加最多

表 6.1.5-7 提籃結構的機械性偏移與幾何尺寸製造公差混凝土護箱臨界分析計算結果

單項變因分析	k_{eff}	σ	Δk_{eff}
標準參考值	0.88729	0.00033	NA
幾何製造公差			
最小燃料管內寬	0.88545	0.00034	-0.00184
最大燃料管內寬	0.88799	0.00033	0.0007
最小圓盤開口內寬	0.88834	0.00033	0.00105
最大圓盤開口內寬	0.88700	0.00034	-0.00029
最小圓盤開口間距	0.88790	0.00033	0.00061
最大圓盤開口間距	0.88684	0.00033	-0.00045
機械性偏移			
燃料束偏移至右上角	0.86965	0.00034	-0.01764
燃料束偏移至上方	0.87888	0.00033	-0.00841
燃料束偏移至左上角	0.88268	0.00033	-0.00461
燃料束偏移至左側	0.89109	0.00034	0.0038
燃料束偏移至左下角	0.89587	0.00034	0.00858
燃料束偏移至下方	0.89209	0.00034	0.0048
燃料束偏移至右下角	0.88301	0.00034	-0.00428
燃料束偏移至右側	0.87823	0.00033	-0.00906
燃料束徑向朝內偏移	0.89978	0.00034	0.01249*
燃料束徑向朝外偏移	0.87331	0.00034	-0.01398
燃料管偏移至右上角	0.88792	0.00034	0.00063
燃料管偏移至上方	0.88795	0.00035	0.00066
燃料管偏移至左上角	0.88717	0.00034	-0.00012
燃料管偏移至左側	0.88681	0.00034	-0.00048
燃料管偏移至左下角	0.88650	0.00034	-0.00079
燃料管偏移至下方	0.88696	0.00034	-0.00033
燃料管偏移至右下角	0.88754	0.00034	0.00025
燃料管偏移至右側	0.88809	0.00035	0.0008
燃料管徑向朝內偏移	0.89253	0.00034	0.00524*
燃料管徑向朝外偏移	0.88098	0.00032	-0.00631
結合兩單項變因分析			
燃料束和燃料管同時徑向朝內偏移	0.90402	0.00033	0.01673

*單項變因造成反應度增加最多

表 6.1.5-8 正常情況下傳送護箱臨界分析計算結果

水密度 (g/cm ³)		護套間隙 注水	¹⁰ B 含量	k _{eff}	σ	k _s
密封鋼筒內	密封鋼筒外					
1.0	1.0	否	75%	0.90516	0.00033	0.91540
0.9	0.9	否	75%	0.89289	0.00033	0.90313
0.8	0.8	否	75%	0.87919	0.00033	0.88943
0.7	0.7	否	75%	0.86062	0.00033	0.87086
0.6	0.6	否	75%	0.83773	0.00033	0.84797
0.5	0.5	否	75%	0.80822	0.00032	0.81846
0.4	0.4	否	75%	0.76878	0.00032	0.77902
0.3	0.3	否	75%	0.71745	0.00032	0.72769
0.2	0.2	否	75%	0.64764	0.00027	0.65787
0.1	0.1	否	75%	0.55489	0.00022	0.56511
1.0	0.0001	否	75%	0.90448	0.00034	0.91473
0.9	0.0001	否	75%	0.89370	0.00033	0.90394
0.8	0.0001	否	75%	0.87960	0.00033	0.88984
0.7	0.0001	否	75%	0.86088	0.00032	0.87112
0.6	0.0001	否	75%	0.83815	0.00034	0.84840
0.5	0.0001	否	75%	0.80870	0.00033	0.81894
0.4	0.0001	否	75%	0.76962	0.00032	0.77986
0.3	0.0001	否	75%	0.71835	0.00031	0.72859
0.2	0.0001	否	75%	0.64926	0.00028	0.65949
0.1	0.0001	否	75%	0.55574	0.00022	0.56596

表 6.1.5-9 事故情況下傳送護箱臨界分析計算結果

水密度 (g/cm ³)		護套間隙 注水	¹⁰ B 含量	k _{eff}	σ	k _s
密封鋼筒內	密封鋼筒外					
1.0	0.0001	是	75%	0.90871	0.00033	0.91895
1.0	1.0	是	75%	0.90836	0.00033	0.91860
0.9	0.9	是	75%	0.89685	0.00035	0.90710
0.8	0.8	是	75%	0.88295	0.00034	0.89320
0.7	0.7	是	75%	0.86657	0.00034	0.87682
0.6	0.6	是	75%	0.84436	0.00034	0.85461
0.5	0.5	是	75%	0.81454	0.00033	0.82478
0.4	0.4	是	75%	0.77691	0.00032	0.78715
0.3	0.3	是	75%	0.72712	0.00031	0.73736
0.2	0.2	是	75%	0.66043	0.00028	0.67066
0.1	0.1	是	75%	0.56898	0.00023	0.57920

表 6.1.5-10 正常和異常情況下混凝土護箱臨界分析計算結果

水密度 (g/cm ³)		護套間隙 注水	¹⁰ B 含量	k _{eff}	σ	k _s
密封鋼筒內	密封鋼筒外					
0.0001	1.0	否	75%	0.35085	0.00014	0.36106
0.0001	0.9	否	75%	0.35048	0.00013	0.36069
0.0001	0.8	否	75%	0.35069	0.00014	0.36090
0.0001	0.7	否	75%	0.35088	0.00014	0.36109
0.0001	0.6	否	75%	0.35125	0.00014	0.36146
0.0001	0.5	否	75%	0.35199	0.00014	0.36220
0.0001	0.4	否	75%	0.35329	0.00015	0.36350
0.0001	0.3	否	75%	0.35589	0.00014	0.36610
0.0001	0.2	否	75%	0.36006	0.00014	0.37027
0.0001	0.1	否	75%	0.36470	0.00013	0.37491
0.0001	0.0001	否	75%	0.35487	0.00012	0.36507

表 6.1.5-11 事故情況下混凝土護箱臨界分析計算結果

水密度 (g/cm ³)		護套間隙 注水	¹⁰ B 含量	k _{eff}	σ	k _s
密封鋼筒內	密封鋼筒外					
1.0	0.0001	是	75%	0.90852	0.00034	0.91877
1.0	1.0	是	75%	0.90766	0.00034	0.91791
0.9	0.9	是	75%	0.89625	0.00035	0.90650
0.8	0.8	是	75%	0.88271	0.00033	0.89295
0.7	0.7	是	75%	0.86521	0.00033	0.87545
0.6	0.6	是	75%	0.84336	0.00033	0.85360
0.5	0.5	是	75%	0.81380	0.00032	0.82404
0.4	0.4	是	75%	0.77435	0.00033	0.78459
0.3	0.3	是	75%	0.72269	0.00030	0.73293
0.2	0.2	是	75%	0.65183	0.00028	0.66206
0.1	0.1	是	75%	0.55731	0.00022	0.56753

表 6.1.5-12 最大平均初始濃縮度傳送護箱和混凝土護箱臨界計算結果

燃料型式	濃縮度 (wt% ²³⁵ U)	護箱種類	k _{eff}	σ	k _s
GE9B	4.5	傳送護箱	0.93350	0.00034	0.94375
	4.6		0.93704	0.00033	0.94728
	4.5	混凝土護箱	0.93390	0.00034	0.94415
	4.6		0.93765	0.00034	0.94790
ATRIUM™-10	4.562	傳送護箱	0.93953	0.00034	0.94978
	4.562	混凝土護箱	0.93958	0.00034	0.94983

表 6.1.5-13 傳送護箱頂部結構暨密封鋼筒不同水面高度臨界計算結果

傳送護箱 頂部結構	密封鋼筒內水面高度	護套間隙 注水	¹⁰ B 含量	k _{eff}	σ
Shl 情況	0 cm (完全乾的)	是	75%	0.55163	0.00007
	~ 100 cm	是	75%	0.87086	0.00011
	~ 200 cm	是	75%	0.89556	0.00011
	~ 300 cm	是	75%	0.90277	0.00005
	~ 400 cm ^{*1}	是	75%	0.90471	0.00005
	425.2 cm ^{*2}	是	75%	0.90471	0.00005
	453.6 cm ^{*3} (注滿水)	是	75%	0.90474	0.00005
Wnc 情況	453.6 cm ^{*3} (注滿水)	是	75%	0.90459	0.00005

^{*1} 在有效燃料和氣室區的交界附近

^{*2} 在氣室區和上端板區的交界

^{*3} 密封鋼筒內原上端板區材質更換為水

(六) 結語

本臨界安全分析，首先說明了兩種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，已集合所有最保守的組態設置和參數設定，來儘可能涵蓋所有可預期會造成反應度增加的事件與情況，其間並結合極限涵蓋分析法的邏輯，來滿足法規對於要儘可能保守的要求和簡化問題的複雜度。

接著說明了護箱的次臨界安全基準，並以 138 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，而得到一可供護箱臨界評估用來判定護箱在各種正常、異常和事故情況下，是否都能符合法規對於護箱要維持次臨界要求的判定式。

而護箱臨界評估的初步計算結果顯示，在 87 年 4 月 30 日之前退出至核一廠燃料池的用過核子燃料中，反應度最強的 GE9B 燃料（濃縮度 4.0 wt% ^{235}U ，燃料密度 10.45 g/cm³），在提籃的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；傳送護箱在正常情況下的最大 k_{eff} 值為 0.91540，在事故情況下的最大 k_{eff} 值為 0.91895；混凝土護箱在正常情況下的最大 k_{eff} 值為 0.36507，在異常情況下的最大 k_{eff} 值為 0.37491，在事故情況下的最大 k_{eff} 值為 0.91877，顯示傳送護箱和混凝土護箱兩者皆能滿足法規對於 k_{eff} 值要小於或等於 0.95 的規定。若再提高 GE9B 的濃縮度，最高可至 4.6 wt% ^{235}U ，仍能滿足法規的要求。

另外，亦針對核一廠的 ATRIUMTM-10（燃料密度設為 10.45 g/cm³）燃料進行分析，結果發現其濃縮度在 4.562 wt% ^{235}U 的情況下，傳送護箱和混凝土護箱兩者都還能滿足法規的要求。

(七) 参考文献

1. X-5 Monte Carlo Team, “MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5,” April 24, 2003.
2. NAC International, Inc., “Final Safety Analysis Report for the UMS Universal Storage System,” Ch. 5 & 6, Docket No. 72-1015, Revision 3, March, 2004.
3. Gary S. Hoovler, M. Neil Baldwin, Ray L. Eng, and Fred G. Welfare, “Criticality Experiments Supporting Close Proximity Water Storage of Power Reactor Fuel,” Nuclear Technology, Volume 51, pp217-237, December 1980.
4. Bierman, S.R., and Durst B.M., and Clayton, E.D., “Critical Separation between Subcritical Clusters of Low Enriched UO_2 Rods in water with Fixed Neutron Poisons,” Nuclear Technology, Volume 42, pp237-249, March 1979.
5. Bierman, S.R., and Durst B.M., and Clayton, E.D., “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 wt % and 4.29 wt % ^{235}U Enriched UO_2 Rods in water with Uranium or Lead Reflecting Walls,” Nuclear Technology, Volume 47, pp51-58, January 1980.
6. Bierman, S.R., and Clayton, E.D., “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 wt % and 4.31 wt % ^{235}U Enriched UO_2 Rods in water with Steel Reflecting Walls,” Nuclear Technology, Volume 54, pp131-144, August 1981.
7. Bierman, S.R., and Clayton, E.D., “Criticality Experiments with Subcritical Clusters of 2.35 wt % and 4.31 wt % ^{235}U Enriched UO_2 Rods in water at a Water-to-Fuel Volume Ratio of 1.6,” NUREG/CR-1547, PNL-3314, July 1980.
8. Lichtenwalter, J. J. et al, “Criticality Benchmark Guide for Light-Water-Reactor Fuel in Transportation and Storage Package,” ch 2.1.2.7 ~ 8, NUREG/CR-6361, PNL-3314, March 1997 .
9. NAC company, “Verification/Validation of CSAS for LWR Fuel Under the Windows NT Operating System,” ch 5.4, EA913-1010-31, July 1998.
10. Manaranche, J.C. et al, “Dissolution and Storage Experiment with 4.75 wt

% ^{235}U Enriched UO_2 Rods,” Nuclear Technology, Volume 50, pp148 -157,
August 1980

11. 鄧永宏, “臨界評估 MCNP 5 程式驗證計算報告計算書,”
ISFSI-04-CAL-03-06001, 最新版。
12. 鄧永宏, “用過燃料乾式貯存系統護箱臨界安全計算報告計算書,”
ISFSI-04-CAL-03-06002, 最新版。
13. 鄧永宏, “核一廠 ISFSI 傳送護箱表面劑量計算,”
ISFSI-04-CAL-01-06005, 最新版。