

行政院原子能委員會

研究計畫報告

**TRIGA 用過核燃料燃耗評估模式之研究**

**期末報告**

計畫編號：	AEC10102028L
執行單位：	國立清華大學原子科學技術發展中心
計畫主持人：	裴晉哲
報告日期：	中華民國 103 年 11 月

## 內容

壹、	中文摘要 .....	1
貳、	英文摘要 .....	2
參、	作者及所屬單位 .....	3
肆、	計畫緣起與目的 .....	4
伍、	研究方法與過程 .....	10
5.1	概要 .....	10
5.2	實驗設備與系統 .....	13
5.2.1	THOR 與 TRIGA 燃料 .....	13
5.2.2	中子通率量測 .....	18
5.2.3	燃耗量測系統 .....	24
5.3	實驗程序與分析評估 .....	47
5.3.1	實驗操作程序 .....	47
5.3.2	中子通率評估 .....	50
5.3.3	分裂產物特性分析 .....	51
5.4	燃耗量測分析 .....	61

5.4.1	TRIGA 燃料晶格計算 .....	61
5.4.2	$^{239}\text{Pu}$ 之產生 .....	69
5.4.3	燃料之空間自我衰減因子 .....	73
5.4.4	分裂產物活度評估 .....	76
陸、	主要發現與結論 .....	96
6.1.	短半衰期分裂產物活度推導燃耗值 .....	96
6.1.1	由 $^{97}\text{Zr}/^{97}\text{Nb}$ 活度推導燃耗值 .....	97
6.1.2	由 $^{132}\text{I}$ 活度推導燃耗值 .....	102
6.1.3	由 $^{140}\text{La}$ 活度推導燃耗值 .....	104
6.1.4	燃耗值推導方法之驗證 .....	106
6.1.5	結果 .....	107
6.2.	長半衰期分裂產物活度推導燃耗值 .....	130
6.2.1.	由 $^{137}\text{Cs}$ 活度推導燃耗值 .....	131
6.2.2.	由 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 活度比推導燃耗值 .....	134
6.2.3.	由 $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$ 活度比推導燃耗值 .....	137
6.2.4.	結果 .....	138

6.3.	利用 SCALE/TRITON 進行標準尺度計算 .....	139
6.3.1.	THOR 爐心與 TRIGA 燃料 .....	139
6.3.2.	SCALE/TRITON 程式 .....	140
6.3.3.	TRIGA 燃料的燃耗 .....	142
6.4.	結論與建議 .....	148
柒、	參考文獻 .....	150

## 壹、中文摘要

本計畫藉由非破壞性量測方法，量測 THOR 核心 TRIGA 用過核燃料中短半衰期分裂產物之活度，進而推導決定出燃料中  $^{235}\text{U}$  剩餘量，再回推核燃料燃耗，並搭配與 TRITON 中子遷移核心計算程式結果之比對或 MCNP 蒙地卡羅計算，以建立完整的 TRIGA 用過燃料燃耗評估模式。本計畫主要成果有：(1) 在科學上，將燃料中之燃耗量測出，除詳細掌握燃料的含量，有助於日後燃料重新排列以延長核心壽命，並可供中子通率之準確計算，對各項核心及照射束之設計研究，將極為有用，特別在硼中子捕獲治療（Boron Neutron Capture Therapy, BNCT）的癌病治療應用上；(2) 在核子保防上，可提供準確的燃料資訊予國際原子能總署視察人員；(3) 在人才培育上，由於過去十幾年核能量測人才有青黃不接現象，導致國內在核燃料燃耗度評估的人才極為缺乏，本計畫的執行可培育新一代核能人才，並保有專業稀少性科技方法的延續發展。

關鍵詞：TRIGA 用過核燃料、燃耗、分裂產物

## 貳、英文摘要

This project use a nondestructive method to determine the burnup of TRIGA spent fuel at THOR. The  $^{235}\text{U}$  content of TRIGA spent fuels are verified by measuring the activity of short-lived fission product in spent fuel. This method was first successfully used in burnup determinations for plate-type MTR fuels and rod-type TRIGA fuels. It can deduce the spent fuel burnup by gamma-ray spectrometry without using the fuel irradiation history. In this work, in addition to gamma-ray spectra measurements, nuclide and burnup analyses, special emphasis is put into the inter-comparisons between measurements and TRITON core calculations or MCNP calculations in order to fully establish the burnup evaluation methods. The main results of this project include: (1) in the application, the burnup values of THOR can provide essential data for THOR fuel management, moreover, it can provide key information for THOR flux calculation and the improvement of neutron beam design (especially for Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)); (2) in nuclear safeguards, the results can provide exact fuel data to International Atomic Energy Agency (IAEA) inspectors; and (3) in education, it can train many nuclear specialists in new generation and keep the future development of this rare method of nuclear science and technology.

Keywords: TRIGA spent fuel, burnup, fission product

### 參、作者及所屬單位

表 3-1. 作者及所屬單位

作者		所屬單位	
主持人	裴晉哲	國立清華大學	一等核能技術師
兼任助理	黃昱翔	國立清華大學	四等核能技術師
兼任助理	王雅亭	國立清華大學	技術助理

## 肆、計畫緣起與目的

清華水池式反應器 (Tsing Hua Open-pool Reactor, 簡稱 THOR) 是東亞第一且國內目前唯一的一座研究用核反應器。運轉 50 年來, THOR 一直在核能人才培育、科學研究、以及技術發展上, 貢獻良多。在 2000 至 2004 年完成硼中子捕獲治療 (Boron Neutron Capture Therapy, 簡稱 BNCT) 先導性研究後, THOR 已成為可進行癌症治療臨床試驗的照射設施, 並且射束強度與品質已符合國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, 簡稱 IAEA) 的射束規範, 具有國際水準與優勢。國立清華大學原子科學技術發展中心與台北榮民總醫院長期合作進行 BNCT 相關研究, 並自 2008 年起推動臨床人體試驗案, 而後於 2010 年獲得衛生署(2013 年改為衛生福利部)審查通過, 且於同年 8 月 11 日展開首次復發性頭頸癌病人的人體醫療照射, 17 位頭頸癌復發之末期病人於 THOR 接受 BNCT 治療後, 病況皆獲改善, 醫師診斷其中之 6 位病人為受照射腫瘤具完全治癒之反應 (Complete Response), 成效驚人, 堪稱我國在放射治療上的重大成功及重要成就, 更為 THOR 的應用領域開拓了新的里程。癌病治療需要設計精良的中子束, 其關鍵在於需對核心燃料有清楚的瞭解。一般發電用核電廠的燃料, 由於為連續運轉, 故其燃耗度容易



掌握，研究用反應器則不然，其運轉係依據實驗需求而定，故運轉狀況較為複雜，也導致在運轉之後，其核心燃料燃耗度常因在核心擺放位置的不同、時間的長短而有較大差異。因此，發展核燃料的燃耗評估模式非常重要。

本計畫希望藉由非破壞性量測方法，量測燃料中短半衰期分裂產物之活度，進而推導決定出燃料中  $^{235}\text{U}$  剩餘量，再回推核燃料燃耗，此一方法為本中心實驗室所首創之燃耗評估方法，其特色是可以在欠缺燃料過去照射歷史的情形下，仍推算出燃料之燃耗值。計畫中，除進行加馬能譜量測、核種分析、推導之外，並強調與 TRITON 中子遷移核心計算程式結果之比對或 MCNP 蒙地卡羅計算，以建立完整的 TRIGA 用過燃料燃耗評估模式。

THOR 在運轉之初所使用的燃料為濃縮度 19.9% 之片狀 MTR (Material Testing Reactor) 型燃料，後於 1970 年轉換為 93% 高濃縮度之同型燃料。此後，由於國際間防止核武擴散政策，使得高濃縮度鈾燃料之取得日益困難，因此自 1977 年 7 月起，THOR 逐步更換使用 GA (General Atomic) 公司所製造的 TRIGA (Training Research Isotope-production reactor built by GA) 型低濃縮度 (19.9%) 棒狀燃料。至 1987 年 8 月，THOR 爐心燃料已全數更換為 TRIGA 燃料。

MTR 燃料是鈾鋁片狀合金，每片約有 14.5 克鈾， $^{235}\text{U}$  約佔 13.5 克，由 10 片組成 1 燃料元件。TRIGA 燃料則是以 4 根燃料棒組成 1 燃料元件，其主要組成鈾的氫鋯合金 ( $\text{U-ZrH}_{1.6}$ )，燃料棒之中心為一直徑 0.636 公分之鋯棒。目前，THOR 爐心內之 TRIGA 燃料主要可分為兩型：一為 TRIGA-LEU 20/20，即所謂的 TRIGA 長壽型燃料；另一為 TRIGA-LEU 8.5/20，即所謂的 TRIGA 標準型燃料。此兩型燃料  $^{235}\text{U}$  之濃縮度皆為 19.9%，但其差異在前者  $^{235}\text{U}$  所佔的燃料重量百分比為 19.9%，後者為 8.5%。而長壽型燃料中除了有重量百分比較高之  $^{235}\text{U}$  外，另含有 0.5% 之可燃毒物 (Burnable Poison) 鉕 (Erbium)，可壓制燃料在燃耗期間的超溢反應度 (Excess Reactivity)，故可有較長的燃耗時間。

用過核燃料的燃耗分析可提供相當重要之資料，可以評估燃料在反應器中受中子照射情形、反應器功率變化、運轉情形及核心計算，不僅有助於未來利用 THOR 做研究發展之實驗設施的建立（特別是在 THOR 目前所進行的 BNCT 重大研究）。同時，也可進而幫助提供更正確的中子截面資料，以改進核心計算，使燃料能做最佳之利用。

目前 BNCT 中子通率是利用 3 組分裂腔 (Fission Chamber) 計數器來做評估的。這 3 組計數器分別安裝於 THOR 爐心至 BNCT 射束出口的中子路徑上，經由計數器瞬時的讀值對應到在標準功率(1.2 MW)情況下的校正值便可換算出當下的中子通率。若有用過核燃料的燃耗分析資料，對於評估 BNCT 中子通率的準確性將有更大的幫助。

自 1986 年至 2000 年期間，國立清華大學曾利用 THOR 核心更換後的 MTR 用過燃料作燃耗分析，經分析研究後成效良好，業已建立起 MTR 與 TRIGA 用過燃料燃耗之量測分析系統與方法，且已將研究成果發表於國際著名期刊。近十年來，國內雖經歷了核能量測人才青黃不接的時期，核子工程研究所也恢復設立，但在核能量測的專業科技出現了斷層，尤其在燃料燃耗評估上，更因核能設施逐步除役，幾乎達到後繼無人的現象，對於 IAEA 的核子保防 (Safeguards) 工作日益加重的情形下，亟需加強在 THOR 燃料燃耗科技研究的能力與相關人才的培育，此外也可清楚了解 THOR 的核心燃耗狀況，進而幫助目前於 THOR 內正積極進行之研究用設施，如 BNCT，作更進一步的改善。

IAEA 與美國 LOS ALAMOS 國家實驗室，曾有進行燃耗評估研究的合作計畫，建立一套核燃料燃耗量度系統及方法，以核子保防為目的。其他美國、日本、英、法、歐洲等先進國家也有類似進行的研究。除使用加馬能譜分析方法外，還有( $\gamma$ , n)中子度量等，主要是利用長半衰期分裂產物作為分析指標，甚至利用破壞性方法以化學分離方式來分析。

國內國立清華大學過去曾做過類似的研究。由文獻顯示，在傳統上一般皆使用長半衰期分裂產物來分析核燃料的燃耗值，但在 1986 年至 2000 年的期間，國立清華大學另行發展並建立了一套新的燃耗分析方法，利用片狀 MTR 與棒狀 TRIGA 用過燃料，將其重新置於反應器爐心再照射，而後量測其中堆積之短半衰期分裂產物  $^{97}\text{Zr}/^{97}\text{Nb}$ 、 $^{132}\text{I}$  及  $^{140}\text{La}$  的活度，再推導出燃料的燃耗值。其研究方法與過去不同者在於，除了利用長半衰期分裂產物作為分析指標外，主要乃利用短半衰期分裂產物來決定其燃耗值，以較新的 Intrinsic Calibration 方法求得在用過燃料中不同加馬能峰的衰減係數及其偵檢效率。此分析研究方法，在國際著名期刊發表<sup>1-5</sup>。近來，許多學者更參考我們發展的方法，發表了不少相關的研究成果<sup>6-9</sup>。與之前的研究不同之處，主要在於本研究由最起初量測 MTR 型片狀燃料的

量測與分析，改進應用到 TRIGA 型棒狀燃料的量測與分析，並引進了燃料晶格計算與分析，本研究計畫係根據之前燃耗量測的分析系統與研究方法為基礎，更進一步利用 SCALE/TRITON 中子遷移核心計算程式，進行燃耗的評估，並對目前核心燃料做燃耗量測分析與比對，以建立起 TRIGA 燃料的完整燃耗評估模式。

## 伍、研究方法與過程

### 5.1 概要

本文所使用之非破壞性加馬能譜方法，可以在對燃料過去照射歷史不明確的狀況下，推算出燃料之燃耗值。此一方法是利用退出 THOR 爐心並經充分冷卻的 TRIGA 用過燃料，將其再置入爐心照射，後經由偵測燃料中重新建立的短半衰期指標分裂產物活度，而分析推導燃料的燃耗值。由於燃料經長時間的冷卻，過去照射期間所建立的短半衰期分裂產物都已衰減殆盡。故而經再照射的用過燃料，其中的短半衰期分裂產物活度強度僅與最近一次的照射有關，而與以往的照射歷史無關；此外分裂產物活度強度又與 $^{235}\text{U}$  在用過燃料中之原子數密度、照射期間的中子通率和相對分裂產率大小有關。在經由分析篩選後，選擇 $^{97}\text{Zr}$ （16.90小時）/ $^{97}\text{Nb}$ （1.20小時）、 $^{132}\text{I}$ （2.30小時）及 $^{140}\text{La}$ （40.27小時）等作為燃耗分析的指標分裂產物，藉由已知的照射時間、分裂產率、分裂截面，並配合照射實驗，運用 $^{197}\text{Au}$  以  $\text{K}_0$ -中子活化分析法（neutron activation analysis-NAA）得到燃料之中子通率，如此可建立起燃耗的疊代計算法（iterative method）。先藉由猜測之 $^{235}\text{U}$  原子數密度，並由以上已知的參數來評估燃料中指標分裂產物的計算活度，再根據與實驗活度比較的結

果，調整下次計算的<sup>235</sup>U 原子數密度，而後如此的反覆推算可推導出用過燃料中剩餘之<sup>235</sup>U 原子數密度  $N_{25}^f$ ，同時可由 FIFA (fissions per initial fissile atom) 公式推導出燃料燃耗值，其公式可表為：

$$B(\%) = \left[ \frac{N_{25}^o - N_{25}^f}{N_{25}^o} \right] \times 100\% \quad (5.1-1)$$

其中

$B$ ：燃料中之燃耗值

$N_{25}^o$ ：在全新 TRIGA 燃料中起初之<sup>235</sup>U 原子數密度

$N_{25}^f$ ：在 TRIGA 用過燃料中剩餘之<sup>235</sup>U 原子數密度

而在運轉照射的情況下，<sup>235</sup>U 含量隨時間變化的計算式如下：

$$-\frac{dN_{25}(\vec{r}, t)}{dt} = \int N_{25}(\vec{r}, t) \sigma_{25}^a(E, t) \phi(\vec{r}, t) dE \quad (5.1-2)$$

為方便表示，(5.1-2) 式可簡寫為：

$$-\frac{dN_{25}}{dt} = N_{25} \sigma_{25}^a \phi \quad (5.1-3)$$

由此可推導得：

$$N_{25}(t) = N_{25}^o e^{-\sigma_{25}^a \phi t} \quad (5.1-4)$$

其中

$N_{25}(t)$ ：在  $t$  照射時間後燃料中剩餘之<sup>235</sup>U 原子數密度

$\sigma_{25}^a$ ：<sup>235</sup>U 的吸收截面

$\phi$ ：中子通率

$t$ ：燃料照射時間

為了對本文中藉分析短半衰期分裂產物活度所發展出的燃耗推導法進行驗證，除了利用已知燃耗為零之全新 TRIGA 燃料進行可行性的評估外，亦運用傳統長半衰期之分裂產物 <sup>137</sup>Cs (30.17 年)、<sup>134</sup>Cs (2.06 年) /<sup>137</sup>Cs 活度比及 <sup>106</sup>Ru (1.02 年) /<sup>137</sup>Cs 活度比為指標，來決定燃料的燃耗值，藉由比較兩者所得結果的一致性，以確立此一燃料燃耗評估方法之建立。



## 5.2 實驗設備與系統

TRIGA 燃料燃耗評估的量測實驗，選擇在 THOR 用過燃料池的池邊進行，除了利用池水作冷卻燃料的功用外，亦運用其作為輻射屏蔽，以阻擋來自 TRIGA 照射過燃料極強的加馬輻射。本章介紹實驗的設備與系統，以對於實驗的進程序及分析，作適當的規劃與安排。

### 5.2.1 THOR 與 TRIGA 燃料

#### 5.2.1.1 THOR

在進行 TRIGA 燃料燃耗量測之前，首先對 THOR 爐心之相關資料應有一瞭解，以利於實驗及計算分析之進行。以下為 THOR 爐心之簡要敘述。

THOR 為一高於地面並具有可移動核心之研究用反應器，其核心裝填 TRIGA 鈾燃料，以鋁架懸吊深浸在深33英尺的開放水池中。池水周圍為水泥屏蔽牆，池中高度清潔過濾的水，不僅作為冷卻劑、中子緩和劑及透明的輻射屏蔽，亦使池中之設備常年清晰可見，不僅使爐房內在運轉時的輻射值不致過高，有利於工作人員的維護操作外，並可增長設備的使用年限。

THOR 係一多用途且俱有先天安全特性之研究用反應器，原額定熱功率為1 MW，而後於民國87年獲原能會核准提升功率至2 MW。其原設計製造者為美國 G.E.公司，建造開始於民國48年，民國51年10月達到初次全功率運轉，為首座安裝於中華民國的核反應器。其提供足夠的功率及中子通率，對於許多研究領域的瞭解及工作成效，有相當大的助益，這些領域包括物理、化學、工程、醫學及材料科學等方面之研究。

表5.2-1列出 THOR 之基本相關資料。圖5.2-1是 THOR 之側視圖，圖5.2-2是 THOR 之俯視圖。圖5.2-3則為 THOR 爐心排列圖，從圖中顯示出爐心中的 TRIGA 燃料（圖5.2-4）、用來監測在運轉期間之燃料溫度而裝置有熱偶計的 TRIGA 儀器燃料棒（圖5.2-5）、石墨、水中垂直照射管、控制板、輻射偵檢器及中子源等不同元件在爐心中的排列位置。

另外 THOR 中的”E4”是燃料再照射的位置，平時運轉時有石墨元件放置於該位置，當進行燃料再照射實驗時，所要進行燃耗分析之待測 TRIGA 燃料將取代”E4”位置的石墨元件，再於實驗所預定之功率下運轉；燃料進行再照射同時，在燃料棒外圍，依據所要進行燃耗量測的相對位置佈置金線，用以量測實驗運轉當時之中子通率，

以作為實驗分析及計算評估之參考資料。

### 5.2.1.2 TRIGA 燃料

TRIGA 燃料是以四根燃料棒組成一燃料元件，其主要組成為鈾的氫鋯合金 (U-ZrH<sub>1.6</sub>)，燃料棒中心為一直徑0.636公分之鋯棒。目前，THOR 爐心內所使用之 TRIGA 燃料主要可分為兩型：一為 TRIGA-LEU 8.5/20，即所謂的 TRIGA 標準型燃料；另一為 TRIGA-LEU 20/20，即所謂的 TRIGA 長壽型燃料。此二型燃料<sup>235</sup>U 之濃縮度皆為19.9%，但其差異在前者<sup>235</sup>U 所佔的燃料重量百分比為8.5%，而後者為19.9%。而 TRIGA-LEU 20/20中除了有重量百分比較高之<sup>235</sup>U 外，另含有0.5%之可燃毒物 (burnable poison) Er，由於<sup>167</sup>Er 對中子吸收截面相當高，可壓制燃料在燃耗期間的超溢反應度，故可有較長的燃耗時間。表5.2-2是 TRIGA 燃料元件之等效單元值。

THOR 中曾使用 MTR 燃料來運轉，而後再更換為 TRIGA 燃料。而這兩種燃料元件在特性上有許多不同之處，其主要的差異在：MTR 燃料元件是由十個片狀燃料結合而成，而 TRIGA 燃料元件由四根燃料棒組成一燃料元件；MTR 燃料之<sup>235</sup>U 之濃縮度為93%，屬高濃縮度之鈾燃料，TRIGA 燃料之<sup>235</sup>U 之濃縮度為19.9%，屬低濃縮度之鈾燃料。因有這些特性上的差異，亦造成兩者在燃耗的分析上，有不

同之處。TRIGA 燃料和 MTR 燃料之間的比較歸納表示於表5.2-3。圖5.2-4是 TRIGA 燃料棒與燃料元件，圖5.2-5是具有熱偶計的 TRIGA 儀器燃料棒，圖5.2-6則表示出 TRIGA 燃料元件之等效晶格及燃料棒之幾何尺寸，等效晶格經計算為 3.887 cm，燃料棒的直徑為 3.493 cm，其中心並有直徑 0.636 cm 鉛棒。

以 U-ZrH<sub>1.6</sub>作為燃料的最大優點，在於其具有立即負溫度反應度係數（prompt negative temperature coefficient of reactivity），這項特性使得 TRIGA 燃料在使用上更為安全。若反應器功率在極短時間內上升千倍以上，負溫度反應度係數會立即發生作用，將功率降至正常狀態。而氫對鉛之比值定於1.6，其主要功用在於確保因溫度突然上升或長時間於高溫運轉情況下，仍能維持燃料的完整性，同時 TRIGA 燃料以 SS-304作燃料護套，使得 TRIGA 燃料可在1000 °C的溫度之下運轉，仍不致有護套破裂，而導致分裂產物外洩的情形發生。

立即負溫度反應度係數的基本原理是當溫度上升時，在燃料中的熱中子和氫原子碰撞而獲得能量的機率增加，因此使得中子能譜硬化(hardened)而向高能量區平移，造成中子的平均自由路徑(mean free path)較長，因此逃脫的機率增加，使得其在燃料中被捕獲的機率減少。但中子離開燃料進入水中，經水之減速會再度被熱化

(rethermalized)，所以在水中時，因溫度上升造成中子捕獲機率減少的效應並不明顯。結果燃料對整個晶格吸收率的比值，隨溫度上升而減小，造成反應度下降。另外在 TRIGA-LEU 20/20 燃料中加入可燃毒物鉬，除可延長每一爐心週期長度外，亦可增加負溫度係數的效應。此乃是因為  $^{167}\text{Er}$  在 0.5eV 附近有二個共振能峰，當溫度上升時，將熱中子通量分佈推往高能區，使得鉬在熱中子能區的中子吸收率增加，如此造成分裂率下降，亦使得反應度下降。

## 5.2.2 中子通率量測

由於本文中，利用短半衰期分裂產物活度推導燃料燃耗的新評估方法，在活度的分析評估時，需要中子通率的數據來求得活度，故必須於 TRIGA 燃料進行再照射的同時，取得 TRIGA 燃料的中子通率。而中子通率的量測，是利用  $^{197}\text{Au}$  的在爐心中照射，以產生  $^{198}\text{Au}$  放射性同位素，並運用  $K_0$ —中子活化分析法，來評估燃料再照射時的中子通率。中子通率評估的準確性，對於本文中所發展之新方法能否準確的決定燃料燃耗值，有絕對的影響。以下乃就中子通率的計數系統、計數系統校正及 TRIGA 燃料中子通率實際的量測結果，分別加以說明。

### 5.2.2.1 中子通率計數系統

為評估燃料再照射時的中子通率，乃於核輻射度量實驗室中進行照射後之  $^{198}\text{Au}$  加馬射線能譜的量測分析。所使用之偵檢器為 CANBERRA 公司 GC3520 型高純鍺偵檢器，其在 1.33MeV 能量時對直徑 3 英吋、高 3 英吋之標準 NaI (Tl) 閃爍體的相對效率為 35%；而在 1.33MeV 能峰的鑑別率（即半高全寬值 full width at half maximum-FWHM）為 2.0keV。使用的能譜分析軟體為 CANBERRA 公司之 SAMPO-90。圖 5.2-7 為核輻射度量實驗室之中子通率計數系

統的方塊圖。

### 5.2.2.2 中子通率計數系統校正

對於核輻射度量實驗室之中子通率計數系統的絕對效率校正，選擇以<sup>152</sup>Eu 元素作為量測計數系統之標準射源。<sup>152</sup>Eu 能譜具有許多明顯的加馬能峰(121.8 keV、344.3 keV、411.1 keV、444.0 keV、778.9 keV、964.1 keV、1085.9 keV、1089.7 keV、1112.1 keV、1299.1 keV及1408.0 keV)，由於<sup>198</sup>Au 的主要能峰411.8 keV 與<sup>152</sup>Eu 的411.1 keV 能峰非常接近(僅相差約0.17%)，這使得計數時，可以準確快速的得到計數系統的絕對效率。另外，<sup>152</sup>Eu 之半衰期(half-life)為13.33年，故每次實驗前後因時間所造成標準射源衰減的因素可以忽略。本文中，於每次進行<sup>198</sup>Au 放射性同位素計數之前，均同時利用<sup>152</sup>Eu 射源作中子通率計數系統的絕對效率。

### 5.2.2.3 TRIGA 中子通率

如5.1節中所描述，由於本文發展的分析方法是藉由已知的照射時間、分裂產率和分裂截面，量測經再照射燃料中重新建立之短半衰期分裂產物的活度，以推算出在用過燃料中<sup>235</sup>U 之最終原子數密度 $N_{25}^f$ ，再由此數值推導出燃耗值。然而，燃料棒中短半衰期分裂產

物的活度分佈，與其中的中子通率分佈有直接關係。因此在進行 TRIGA 燃料燃耗量測之前，必須先對燃料棒內、外之中子通率進行瞭解；同時亦需要得到 TRIGA 燃料中熱中子通率與快中子通率之間的分佈關係，藉此求得燃料棒中分裂產物的活度分佈，以進行燃料空間自我衰減因子 ( $f$ -factor) 的分析，並正確的將加馬射線為燃料本身所吸收之部分予以修正。而中子通率的分析，除了可由實驗得到其關係外，亦可由計算方式得知。

在實驗方面，乃應用  $K_0$ -中子活化分析法，將未覆鎳 (bare) 照射金線置於 TRIGA 實驗燃料棒 (experiment rod) 內，同時亦在待測燃料棒外相對的偵測位置，置放了未覆鎳的照射金線；此外，亦準備覆鎳金線與未覆鎳金線，同時將其置於燃料棒外之相關量測位置。而後，將 TRIGA 實驗燃料棒或燃料元件放入 THOR 爐心，於低功率運轉下照射一段時間，再將照射過之金線取出，置於量測計數系統下計數，分析並得到燃料再照射時熱中子通率與快中子通率之間的關係。

熱中子通率與快中子通率值的求得，可以藉由分析照射過後的未覆鎳金線 (熱中子通率 + 快中子通率)、覆鎳金線 (快中子通率) 來得到。未覆鎳金線中子活化公式可表為：



$$A_{sp} = \frac{N_p / t_m}{SCDW}, A_{sp} = R \frac{N_A \theta \gamma_m \varepsilon_p}{M} \quad (5.2-1)$$

如此推導可得：

$$R = \frac{\frac{N_p / t_m}{SCDW}}{N_A \theta \gamma_m \varepsilon_p / M} = \sigma_0 \phi_s + I_e \phi_e \quad (5.2-2)$$

覆錳金線之中子活化公式可表為：

$$R_e = \frac{\left[ \frac{N_p / t_m}{SCDW} \right]_{Cd}}{N_A \theta \gamma_m \varepsilon_p / M} = I_e \phi_e$$

(5.2-3)

其中

$A_{sp}$ ：比計數率  $s^{-1}g^{-1}$

$S$ ：飽和因子  $= 1 - e^{-\lambda t_{irr}}$

$D$ ：衰減因子  $e^{-\lambda t_d}$

$C$ ：測量因子  $= (1 - e^{-\lambda t_m}) / \lambda t_m$

$w$ ：金線之質量

$N_A$ ：亞佛加厥常數

$\theta$  : 金同位素之含量

$\gamma_m$  :  $\gamma_m$ 射線分枝強度

$M$  : 金之克莫耳質量  $g/mole$

$N_p$  :  $t_m$  時間內所量測到加馬能峰之總計數

$\mathcal{E}_p$  : 偵檢系統之能量效率

$t_{irr}$  : 金線之照射時間

$t_d$  : 金線照射後置放一段時間使消除雜質活化因子之衰減時間

$t_m$  : 量測時間

$R$  : 總反應速率

$R_e$  : 快中子反應速率

$\sigma_0$  : 熱中子吸收截面

$\phi_s$  : 熱中子通率

$I_e$  : 共振積分因子

$\phi_e$  : 快中子通率

根據以上 (5.2-2) 、 (5.2-3) 式，使用 MATLAB 程式設計計

算分析程式，以分別得到 TRIGA 燃料之熱中子通率與快中子通率，並將結果運用於燃料空間自我衰減因子及燃料燃耗之分析。

圖 5.2-8 及圖 5.2-9 分別是 TRIGA-LEU 8.5/20 及 TRIGA-LEU 20/20 燃料中，經由上述金線之中子活化分析實驗方法，於 TRIGA 實驗燃料棒中進行未覆錳金線量測所得到之歸一化（normalized）的活度分佈。

在計算分析方面，則運用 WIMS-D4 計算程式來進行燃料晶格計算，以得到 TRIGA 燃料之熱中子通率與快中子通率之關係，詳細過程與結果將敘述於第 5.4 章。

## 5.2.3 燃耗量測系統

### 5.2.3.1 燃耗量測計數系統

TRIGA 燃料的活度偵測實驗，是利用自行設計之燃料燃耗測定平台（參閱圖5.2-10），於 THOR 用過燃料池中進行量測，以藉助池水來作為冷卻及輻射屏蔽之用。此實驗裝置主要包括燃料平台、準直管（collimator）、燃料導引滑輪組、及加馬射線能譜計數系統四大部分。

燃料平台主要由燃料台車及導引軌道所組成。平台大小設計與 TRIGA 燃料元件相當，用以置放待測燃料元件；導引軌道的設置使得在量測計數操作時，可容易將 TRIGA 燃料元件（重量達20 kg）作左右的水平方向移動。準直管則由底部鉛屏蔽、射線導管、及頂端鉛屏蔽組成，該準直管可視實驗需要，由滑輪手動控制其作前後的水平方向移動。射線導管直徑為3.6 cm，其長度為334 cm，主要用以導引待測燃料棒的加馬射線；頂底部鉛屏蔽主要用以阻擋來自其他燃料棒的加馬射線；頂端鉛屏蔽則用以控制計數系統之無感時間（dead time）得以在要求的範圍內。燃料導引滑輪組的作用是帶動燃料台車至準直管下的位置，以控制燃料在水平方向之偵測點。加馬射線能譜計數系統則包括有偵檢座、高純鍍偵檢器、及計數分析

系統。偵檢座是根據高純鍍偵檢器形狀設計的，位於測定平台的最上端；高純鍍偵檢器乃於實驗時置於偵檢座上，經由一長電纜線將信號接至用過燃料池邊實驗式中之偵檢系統，並經由個人電腦進行加馬能譜的記錄與分析。

在量測加馬射線能譜時，所使用之偵檢器為 CANBERRA 公司 GC3018型高純鍍偵檢器，其在1.33MeV 能量時，對直徑3英吋、高3英吋之標準 NaI (TI) 閃爍體的相對效率為35%；且在該能量能峰的鑑別率為1.8keV。實驗時，我們將預備量測之 TRIGA 燃料元件，水平放置於燃料台車上，以準直管導引加馬射線至位於水面上之高純鍍偵檢器，而後至 MCA 計數系統（參閱圖5.2-11）加以記錄之。能譜分析軟體為 ORTEC 公司之 $\gamma$ -Vision。

### 5.2.3.2 燃耗量測系統效率校正

由於 $^{140}\text{La}$  元素之加馬能譜不僅具有許多明顯的加馬能峰（328.8、487.0、815.8、925.2及1596.5 keV），同時也是用過燃料中的分裂產物之一，故本文在進行燃耗量測計數系統之絕對效率校正時，乃考慮選擇 $^{140}\text{La}$  為校正射源。 $^{140}\text{La}$  校正射源之製作是利用 THOR 照射設備，將  $\text{La}_2\text{O}_3$  粉末在中子通率約 $4 \times 10^{12} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$  之下照射約6小時，藉中子活化方式製作成溶液型態之 $^{140}\text{La}$  標準射源。其活度大小是經由一

已校正的高純鍮計數系統量測得知之結果，所測得之活度強度誤差在±1.2%以內。圖5.2-12是<sup>140</sup>La 射源之加馬能譜。

在製作完成溶液型態之<sup>140</sup>La 射源後，將其均勻分佈於方格紙上，製作成四個尺寸大小為長5.485 cm、寬3.6 cm 之長條狀平面校正射源，其均勻性誤差約在±3.0%以內。而後將此四長條狀平面校正射源用防水膠帶分別貼於全新的 TRIGA-LEU 8.5/20型和 TRIGA-LEU 20/20型燃料棒表面（圖5.2-13），再將燃料元件置放於燃料平台上進行加馬能譜計測，如此可分別模擬得到未經燃料棒衰減之系統偵測效率 $\varepsilon_1$ 、經水及一根燃料棒衰減之系統偵測效率 $\varepsilon_2$ 、經一根燃料棒衰減之系統偵測效率 $\varepsilon_3$ 、並經水及二根燃料棒衰減之系統偵測效率 $\varepsilon_4$ 。由這些數值，另可推算 TRIGA 燃料元件對不同能量之加馬射線的衰減係數 $\mu$ （E）值，並可與表列值相比較，兩者的差異亦可做為量測系統設置的正確指標。在本文中之燃耗分析，主要應用到未經燃料棒衰減的系統偵測效率 $\varepsilon_1$ 值來求得燃料燃耗值，而系統偵測效率的計算式如下：

$$\varepsilon = \frac{C/\gamma}{A} \quad (5.2-4)$$

其中

$\varepsilon$ ：加馬能峰的系統效率

$C$ ：加馬能峰的底面積淨計數率（#/sec）

$\gamma$ ：加馬能峰的分支百分比

$A$ ：標準射源的活度（dps）

燃耗量測系統的絕對效率校正是進行本燃料燃耗量測實驗之重要開端，絕對效率校正的準確性，對燃耗評估結果的正確與否有絕對的影響。經由 $^{140}\text{La}$ 實驗效率校正，得到表5.2-4在不同校正狀況下所得到之系統效率。圖5.2-14顯示利用 TRIGA-LEU 8.5/20型和 TRIGA-LEU 20/20型燃料元件，進行燃耗量測系統絕對效率校正的 $\varepsilon_1$ 值，兩者結果相差介於0.3—2.2%範圍間，利用計算機程式將效率校正曲線作多項式符合（polynomial fitting），求得一方程式（列於圖5.2-14，能量  $E$  之單位為 keV），以便使用於燃料的燃耗分析。本文所應用於分析燃耗值的能峰能量，皆位於能量校正之範圍內，而由圖5.2-14結果顯示，可知設置之燃料燃耗量測計數系統在所應用的能量範圍內，系統的誤差不大。

表5.2-4列出由以上校正實驗所得的 TRIGA 燃料衰減係數之實驗值  $\mu_{\text{exp}}(E)$ ，查表值  $\mu_{\text{cal}}(E)$  亦列於其中。由表中顯示，除了少

數低於487.0 keV 能峰所得到之  $\mu_{\text{exp}}(E)$  與  $\mu_{\text{cal}}(E)$  的比值大於8% 外，其餘能峰能量位於487.0及1596.5 keV 間所得的比值結果皆在6% 以下，故於選擇燃耗指標時，考慮其能峰能量應落在487.0及1596.5 keV 範圍內，以降低實驗及分析結果的誤差。在本文中，係採用燃料衰減係數的查表值來分析燃料的燃耗值。



表5.2-1 THOR 基本相關資料

燃料：

TRIGA 棒狀燃料：

標準型：TRIGA-LEU 8.5/20，UZrH<sub>1.6</sub>

長壽型：TRIGA-LEU 20/20，UZrH<sub>1.6</sub>-Er

濃縮度：19.9%

臨界質量：9 kg <sup>235</sup>U

直徑：3.492cm

不鏽鋼護套，厚度：0.0508cm

長度：76.454cm

實際燃料區長度=50.8cm

四根燃料棒組成一燃料元件

燃料共 134 根（58 根 LEU 8.5/20 型，76 根 LEU 20/20 型）

爐心冷卻

強迫一次水流與熱交換器之二次水流進行熱交換，無相位變化

池水總量：80,000 加侖

反應度

控制棒本領（control rod worth）：11.28%

超溢反應度（excess reactivity）：7.0%

1MW 熱功率時之中子通率（ $n/cm^2 \cdot sec$ ）：

平均熱中子通率： $\sim 5.8 \times 10^{12}$

平均快中子通率： $\sim 2.0 \times 10^{13}$

射線管出口之熱中子通率： $\sim 10^6 - 10^9$

控制系統

GA 微電腦控制系統

表5.2-2 TRIGA 燃料元件等效單元

單元 (Unit)	面積 A (cm <sup>2</sup> )	體積分率 (Volume Fraction)
Zr Rod	0.317	0.0210
Fuel Rod	8.714	0.5770
Cladding	0.549	0.0363
Water	5.523	0.3657

表5.2-3 TRIGA 燃料與 MTR 燃料之比較

燃料諸元	TRIGA-LEU		MTR
	20/20	8.5/20	
燃料組成	U-ZrH <sub>1.6</sub> -Er	U-ZrH <sub>1.6</sub>	鈾鋁合金
全長，cm	76.5	76.5	64.0
燃料棒重量，kg	3.85	3.54	0.315
寬度 cm	—	—	7.09
外徑或厚度，cm	3.493	3.493	0.25
<sup>235</sup> U 含量，gm	120.	45.	13.5
燃料區長，cm	50.8	50.8	63.5
<sup>235</sup> U 濃縮度，%	20.	20.	93.0
石墨長，cm	3.84	3.84	—
護套厚度，cm	0.051	0.051	0.025
Er 含量，%	0.5	0.0	—
護套材料	SS-304	SS-304	鋁
H/Zr 比值	1.6	1.6	—

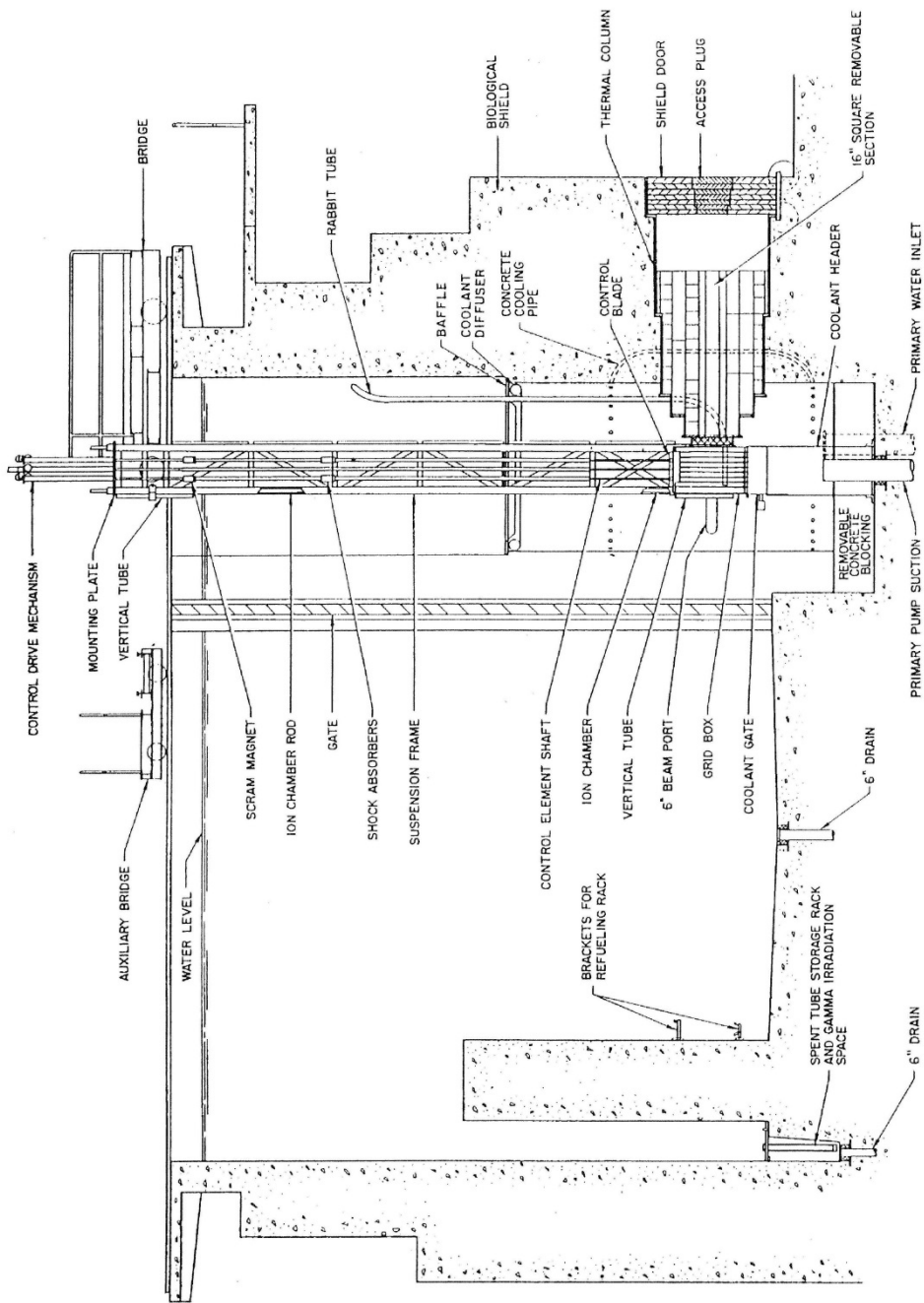
表5.2-4 TRIGA 燃料之系統效率校正及自我屏蔽衰減係數 $\mu$ 之結果比較

Energy (keV)	TRIGA-LEU 8.5/20					
	$\epsilon_1$ ( $1 \times 10^{-6}$ )	$\epsilon_2$ ( $1 \times 10^{-6}$ )	$\epsilon_3$ ( $1 \times 10^{-6}$ )	$\epsilon_4$ ( $1 \times 10^{-6}$ )	$\mu_{\text{exp}}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\mu_{\text{cal}}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
328.8	1.403±0.9%*	0.134±1.5%	0.177±3.8%	0.020±2.2%	0.797±0.8%	0.870
487.0	1.089±0.7%	0.203±0.8%	0.239±1.3%	0.044±1.8%	0.563±0.8%	0.584
815.8	0.732±1.2%	0.219±1.1%	0.241±1.8%	0.069±2.0%	0.399±0.9%	0.407
925.2	0.675±1.6%	0.220±1.4%	0.249±2.2%	0.078±2.4%	0.370±1.4%	0.379
1596.5	0.476±0.7%	0.199±0.6%	0.216±0.9%	0.087±0.9%	0.289±0.5%	0.281

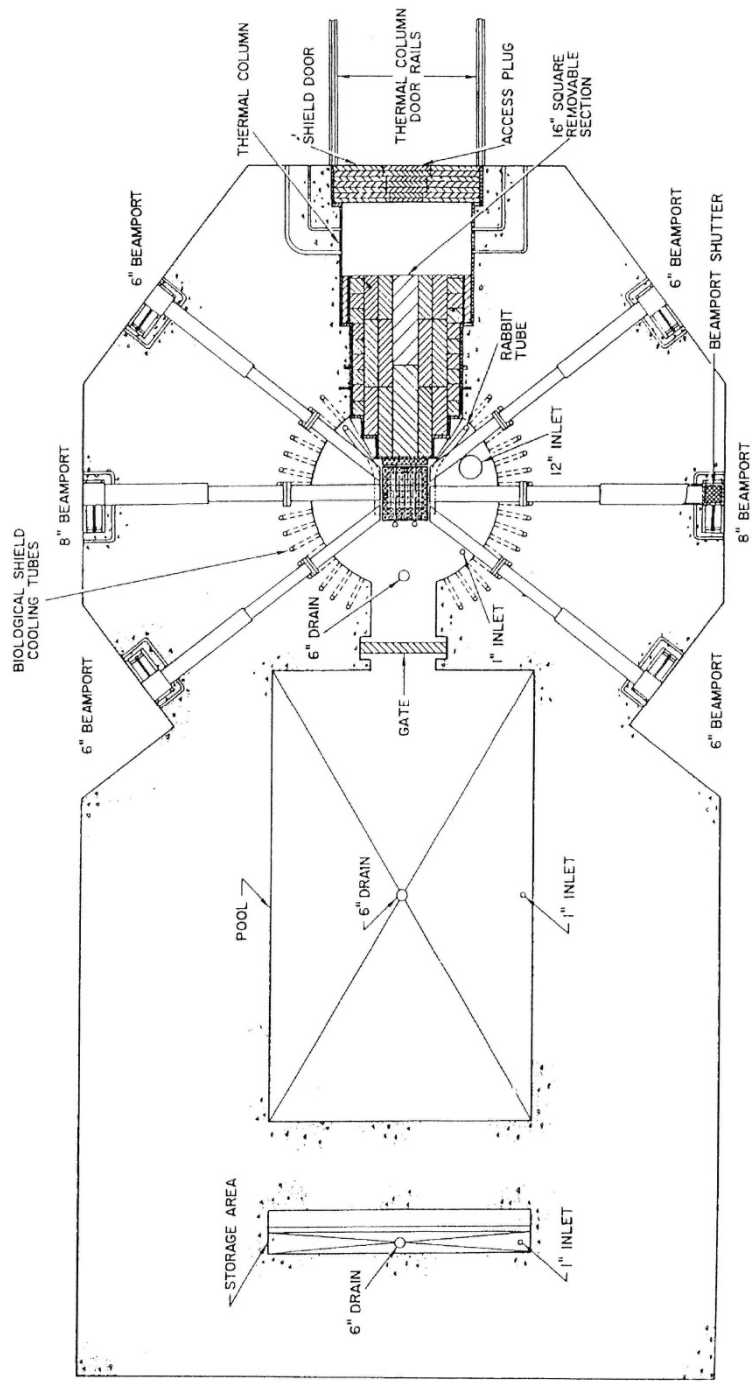
Energy (keV)	TRIGA-LEU 20/20					
	$\epsilon_1$ ( $1 \times 10^{-6}$ )	$\epsilon_2$ ( $1 \times 10^{-6}$ )	$\epsilon_3$ ( $1 \times 10^{-6}$ )	$\epsilon_4$ ( $1 \times 10^{-6}$ )	$\mu_{\text{exp}}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )	$\mu_{\text{cal}}$ ( $\text{cm}^{-1}$ )
328.8	1.399±0.8%	0.091±2.4%	0.093±2.8%	0.006±3.7%	0.939±0.8%	1.176
487.0	1.078±0.4%	0.153±0.8%	0.158±1.1%	0.024±2.6%	0.661±0.9%	0.717
815.8	0.753±0.8%	0.188±1.1%	0.192±1.3%	0.053±2.4%	0.466±0.9%	0.466
925.2	0.661±1.1%	0.192±1.4%	0.195±1.7%	0.062±2.8%	0.413±1.1%	0.429
1596.5	0.487±0.7%	0.182±0.8%	0.188±0.9%	0.069±1.5%	0.330±0.6%	0.311

\*Statistical error in 1 SD



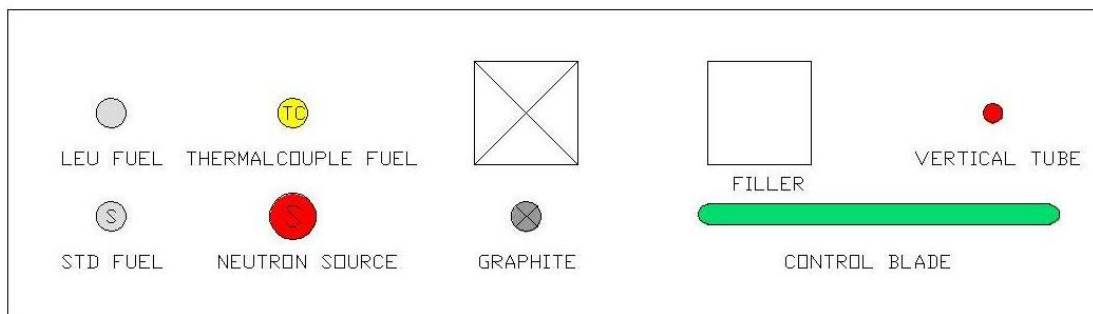
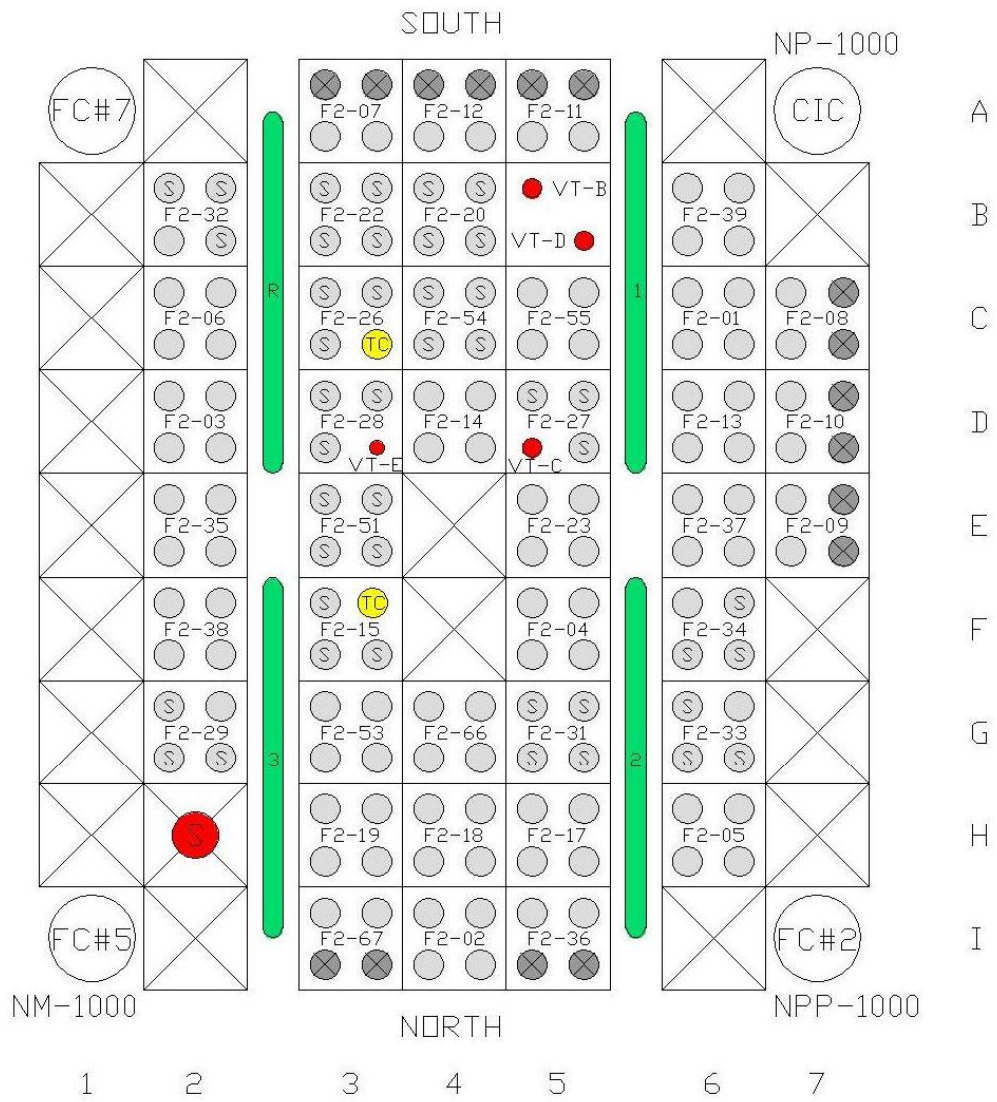
Reactor Assembly (Side View)

圖5.2-1 THOR 側視圖



Reactor Assembly (Plan View)

圖5.2-2 THOR 俯視圖



\*E4 燃料再照射位置

圖5.2-3 THOR 核心配置圖

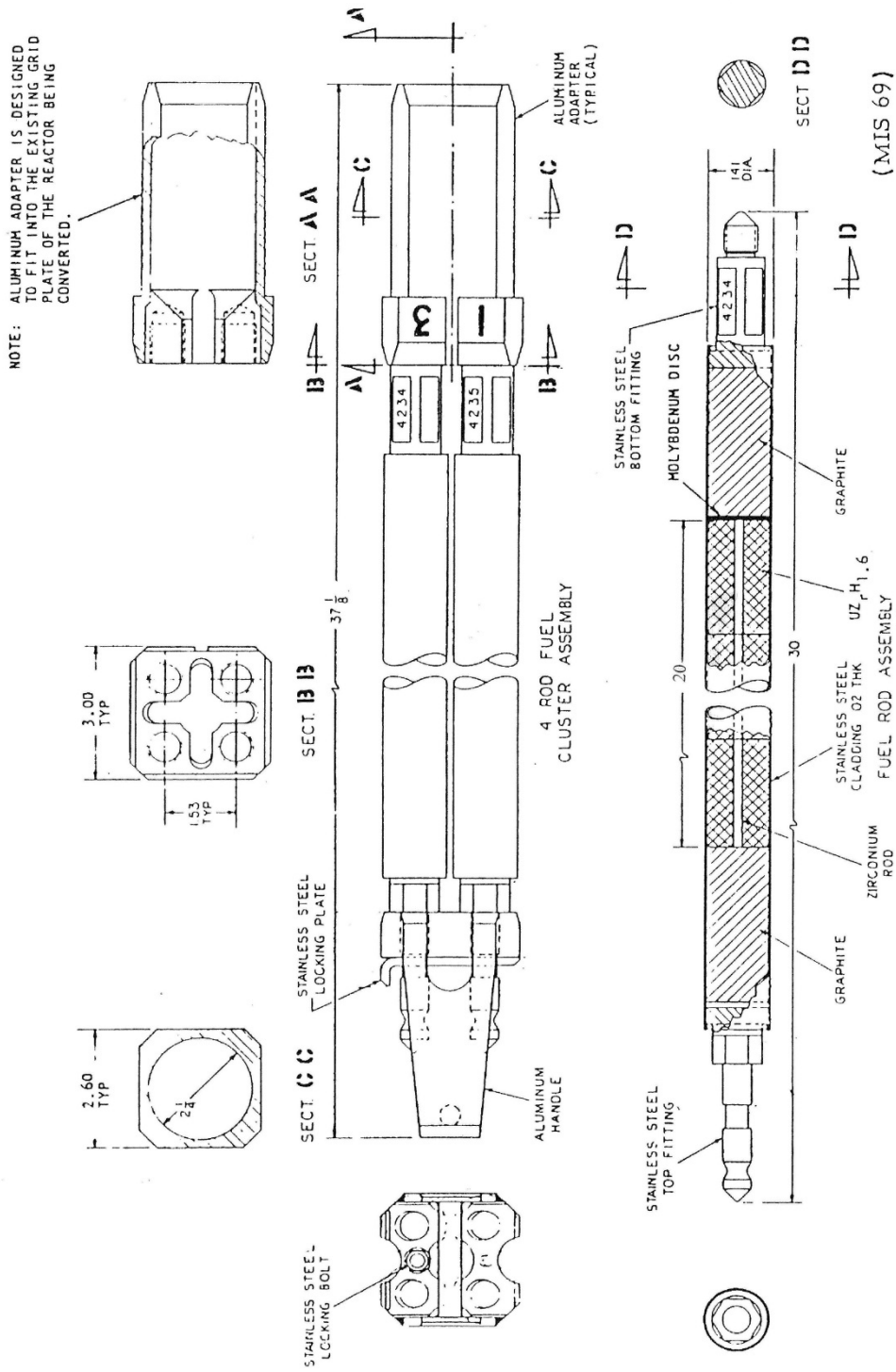


圖5.2-4 TRIGA 燃料棒與燃料元件



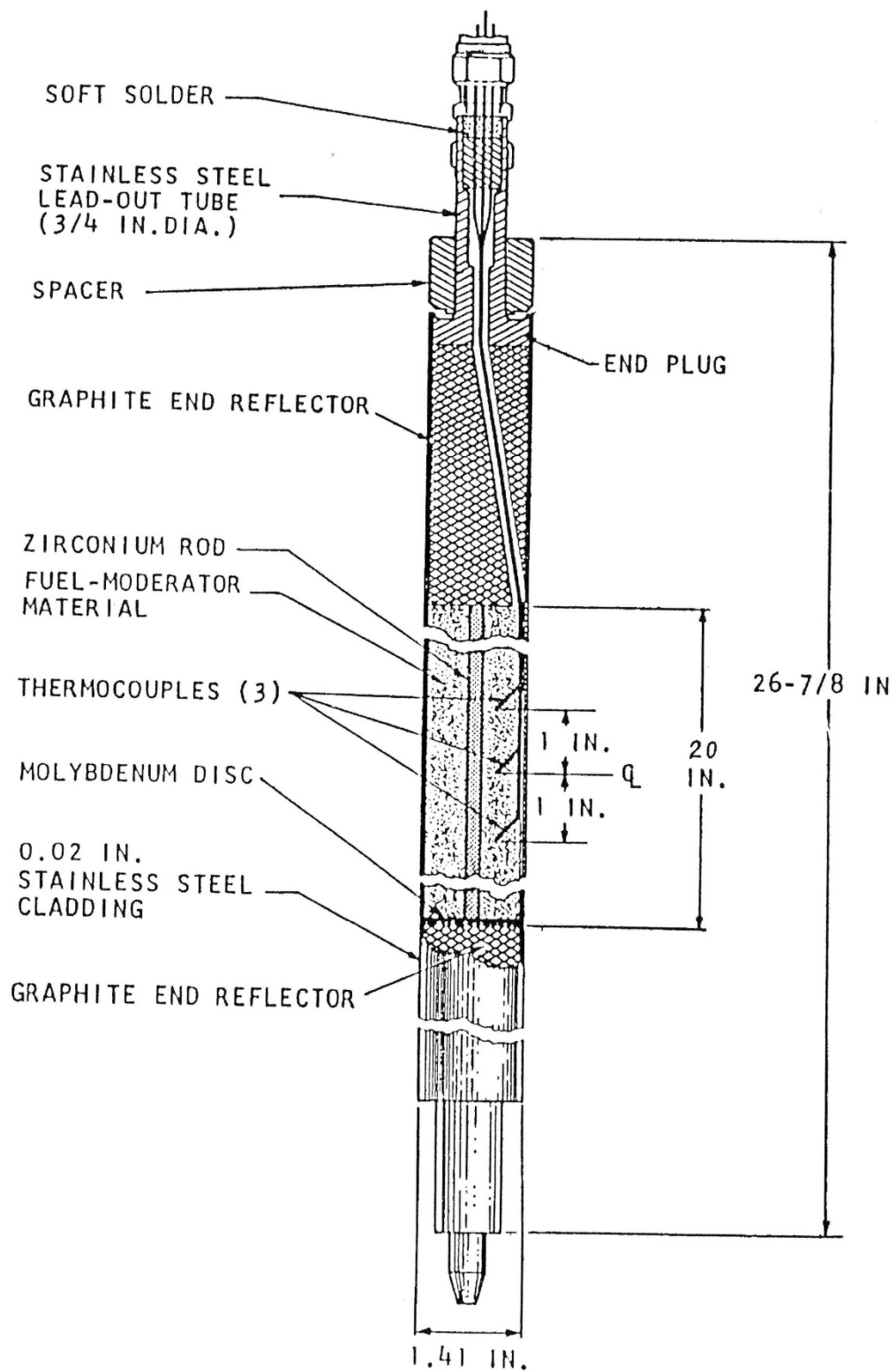


圖5.2-5 TRIGA 儀器燃料棒

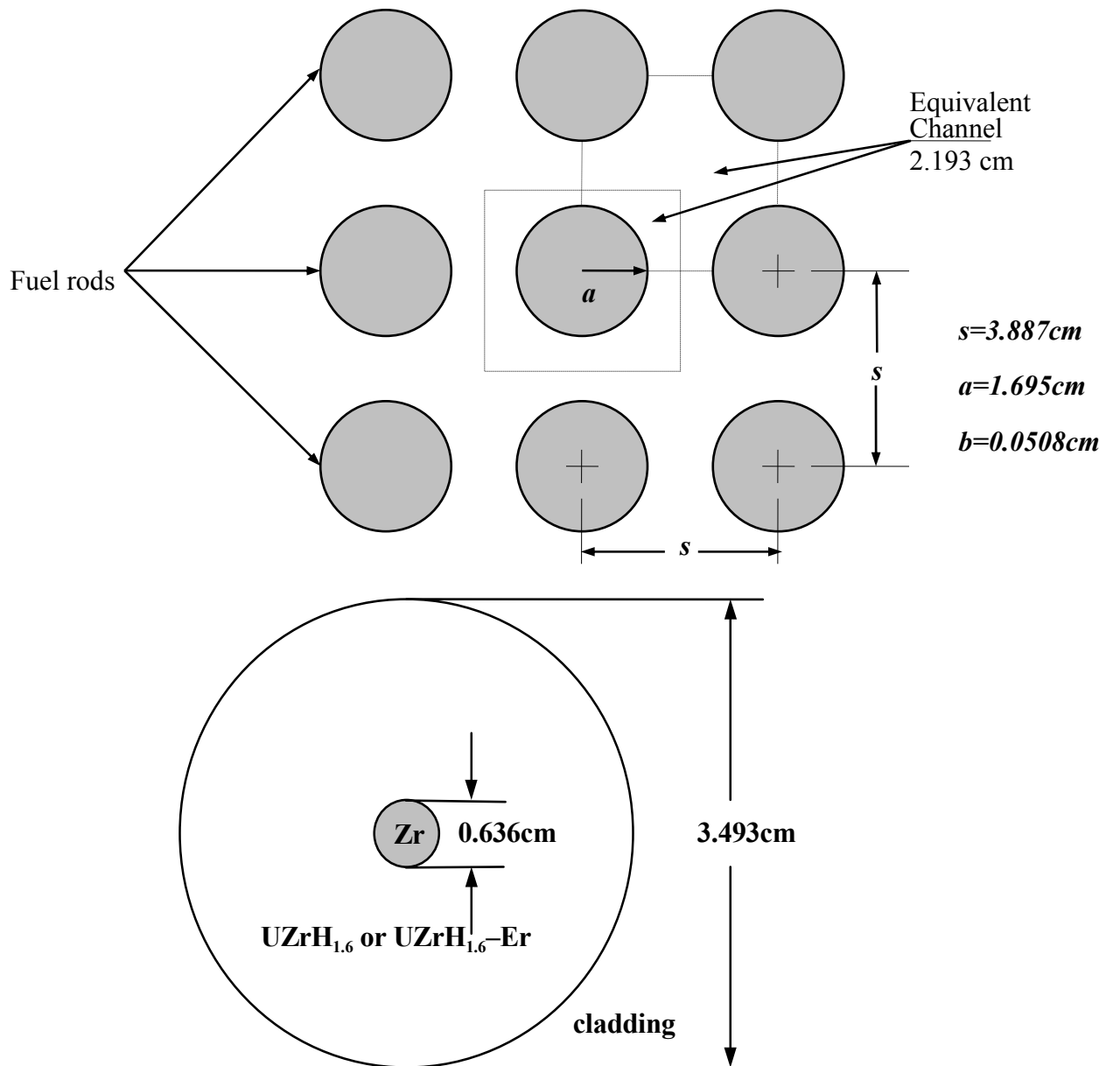


圖5.2-6 TRIGA 燃料元件之等效晶格及燃料棒幾何尺寸

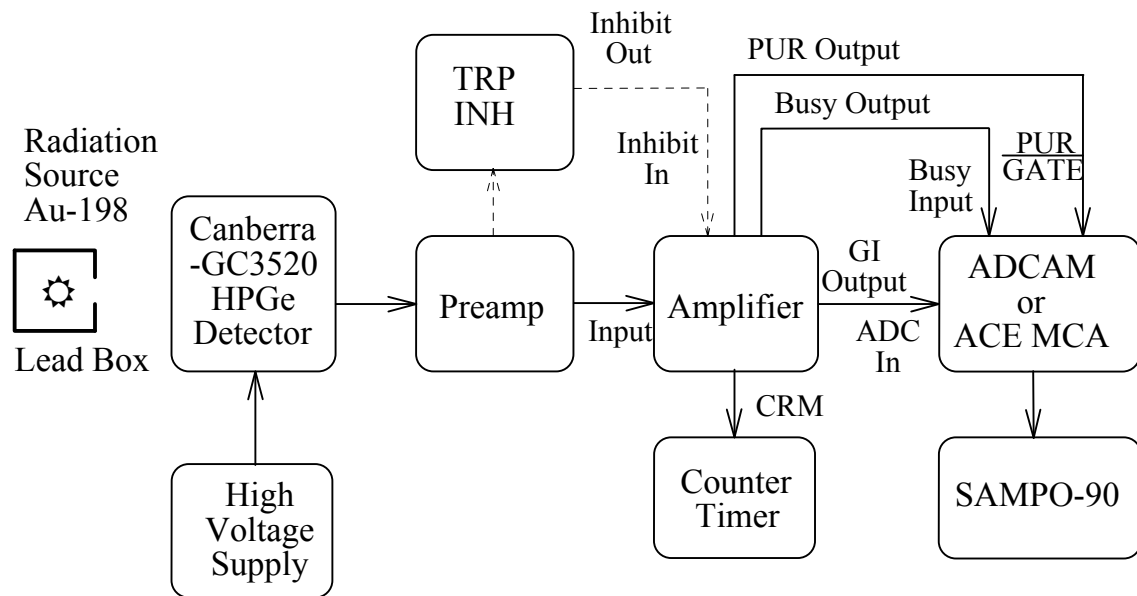


圖5.2-7 中子通率量測計數系統方塊圖

TRIGA-8.5/20 Fuel

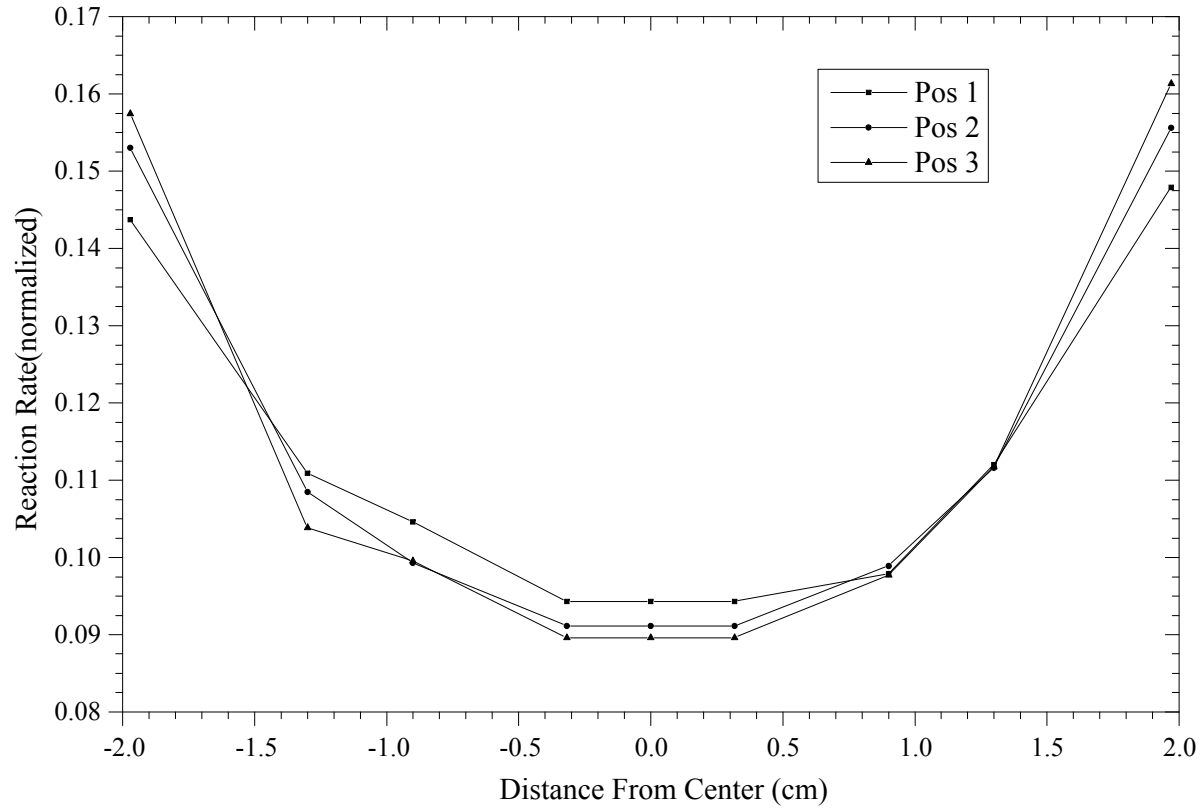


圖5.2-8 TRIGA-LEU 8.5/20燃料棒中金線量測所得活度分佈

TRIGA-20/20 Fuel

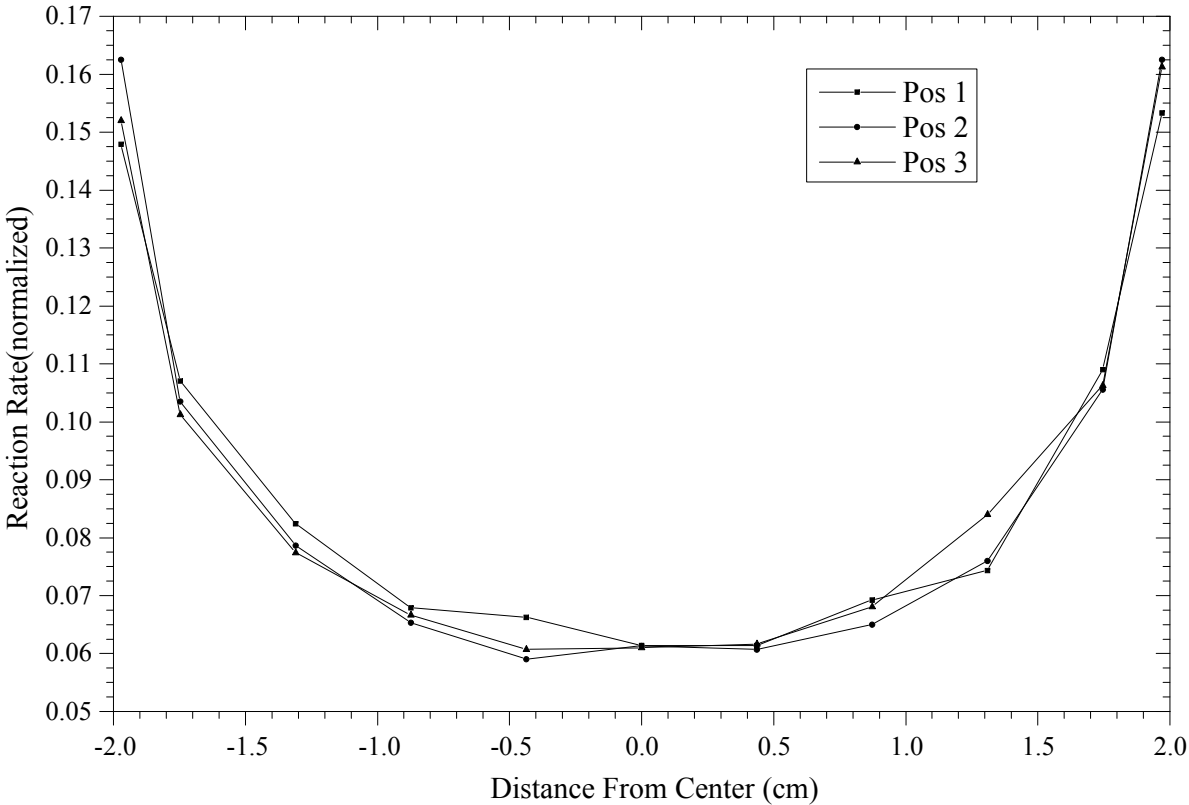


圖5.2-9 TRIGA-LEU 20/20燃料棒中金線量測所得活度分佈

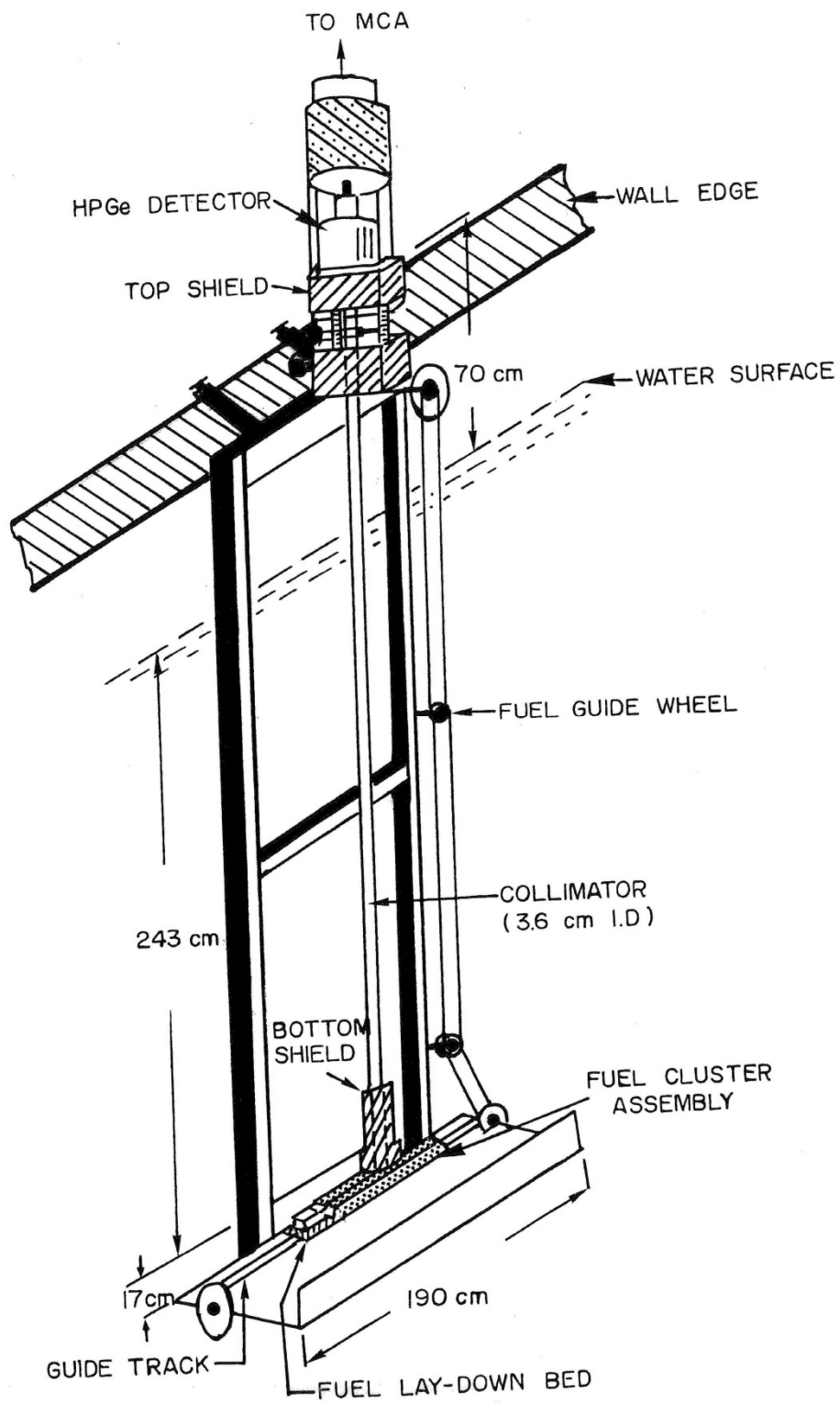


圖5.2-10 燃料燃耗測定平台

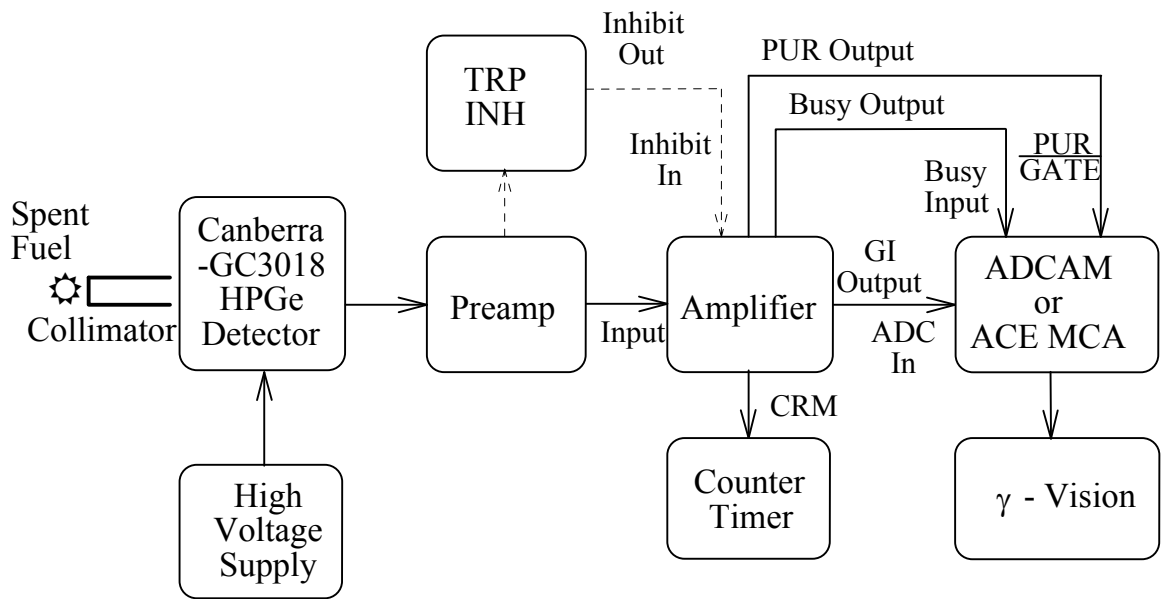


圖5.2-11 燃耗量測計數系統方塊圖

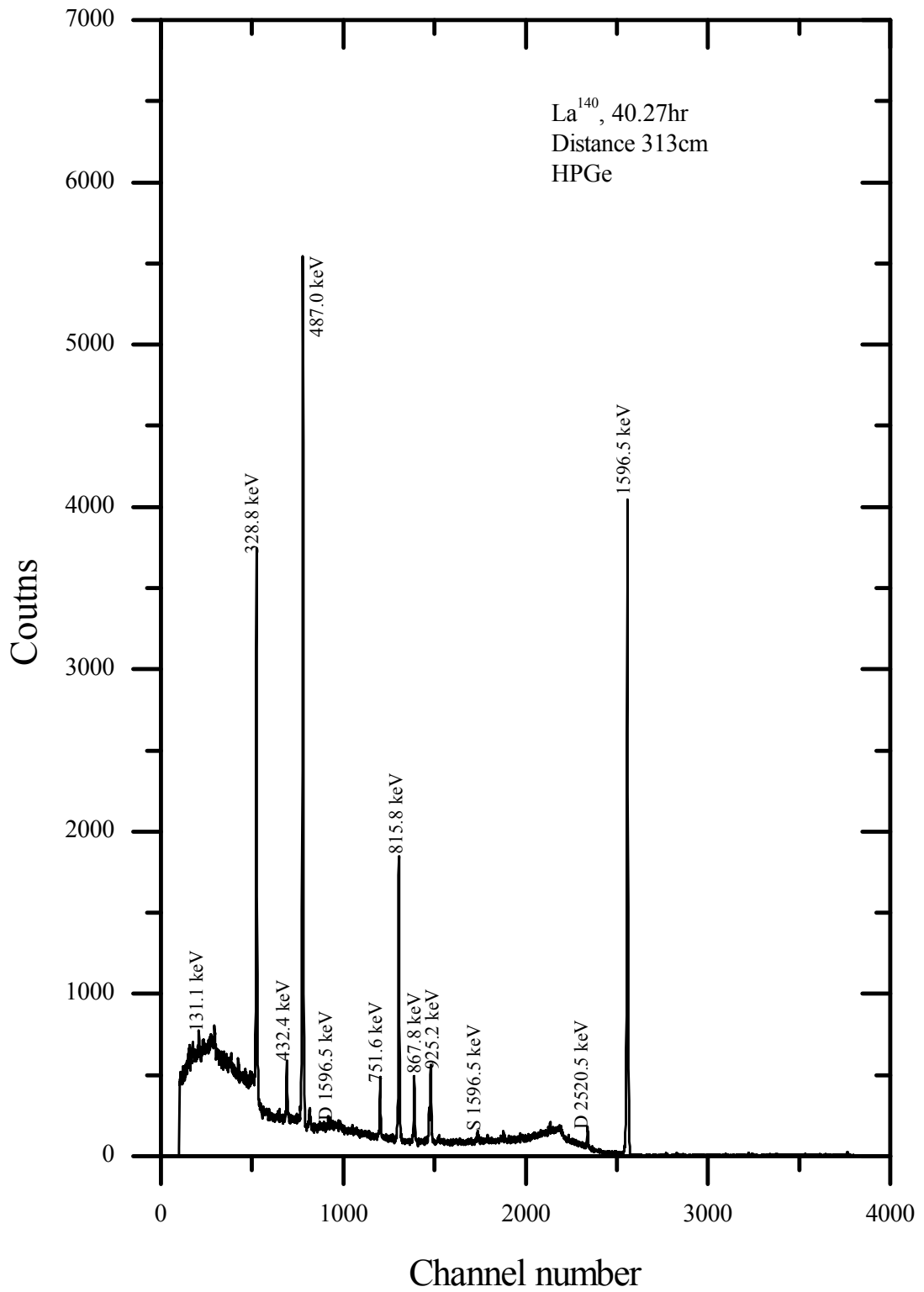


圖5.2-12 <sup>140</sup>La 標準射源能譜



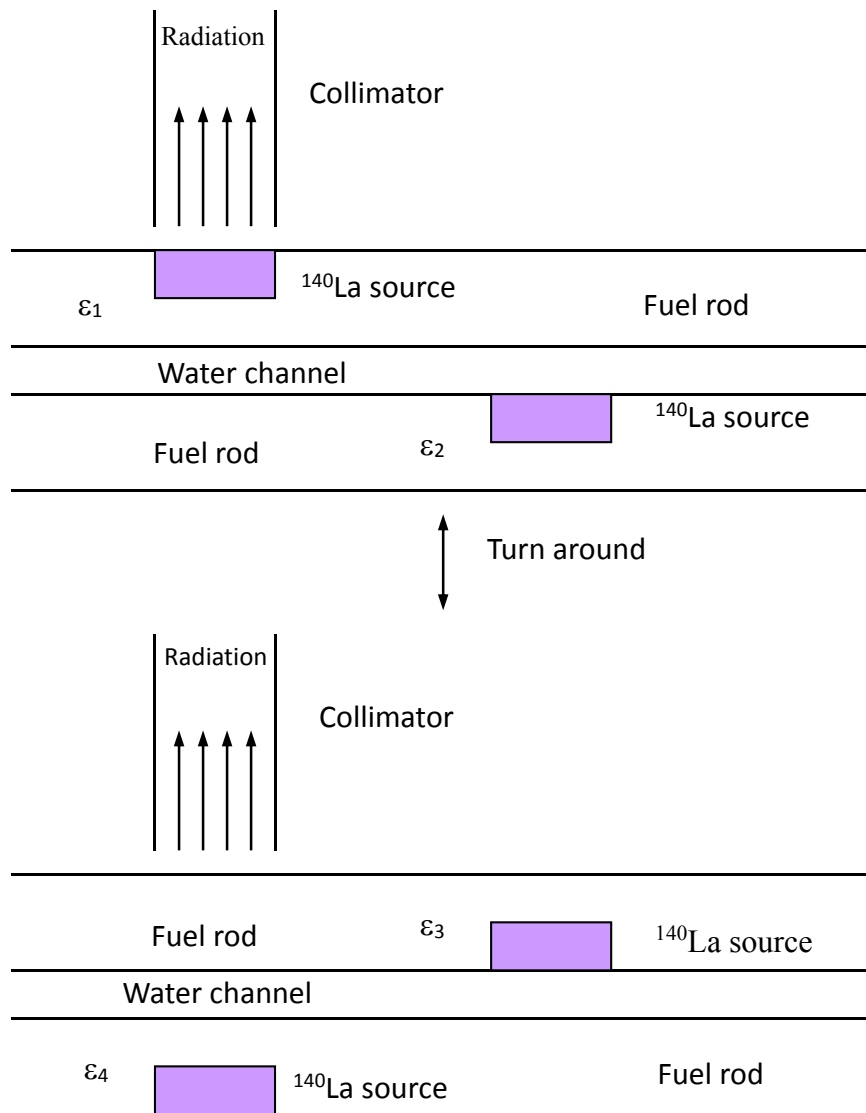
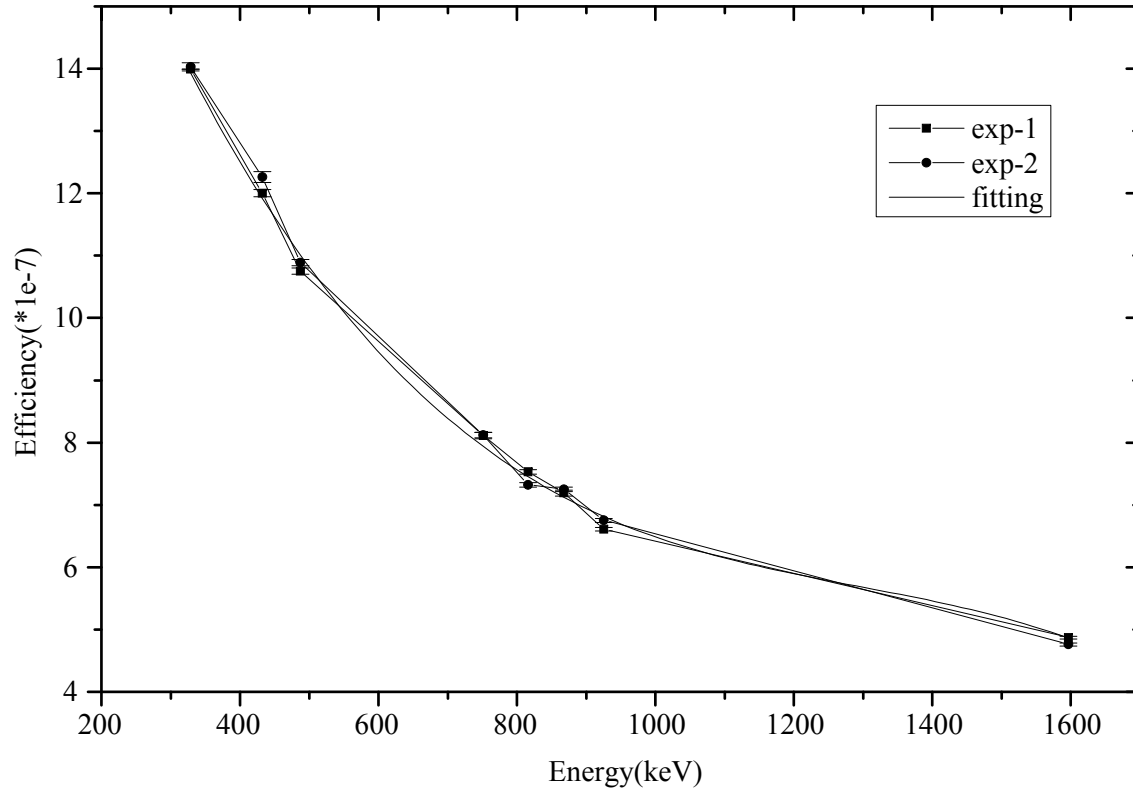


圖5.2-13 燃料燃耗量測系統效率校正

### Calibration of TRIGA Fuel by La-140 Source



Fitting Eq.:  $-6.89 \times 10^{-16} E^3 + 2.67 \times 10^{-12} E^2 - 3.67 \times 10^{-9} E + 2.34 \times 10^{-6}$  ( $E$  in keV)

圖5.2-14 燃料燃耗量測計數系統效率

## 5.3 實驗程序與分析評估

### 5.3.1 實驗操作程序

#### 5.3.1.1 燃料再照射

由於從爐心退出之用過燃料在冷卻一段長時間後，其中的短半衰期分裂產物多已衰減殆盡，必須將 TRIGA 用過燃料置入 THOR 中再照射，以重新建立用過燃料中的短半衰期分裂產物。因此在進行 TRIGA 燃料活度量測前，乃將 TRIGA 用過燃料元件，放置於 THOR 的”E4”位置（圖5.2-3），並於100 kW 功率下進行照射4小時，而後再將照射過的 TRIGA 燃料移至 THOR 低功率池冷卻約二天，使極短半衰期的分裂產物衰減之後，再進行分裂產物的活度量測與分析。

此外，由於後來的燃耗分析，需要利用到 TRIGA 燃料之熱中子通率與快中子通率間的關係，故於燃料再照射過程中，配合後來燃料活度分析相關的8個量測位置（圖5.3-1），在所設計的壓克力棒上分別佈置了覆錳及未覆錳的金線，並於實驗前，將預備好金線的壓克力棒放置於照射燃料元件（在”E4”位置）五個水流通道之中的三個通道內，以量測再照射時燃料棒外的中子通率。

#### 5.3.1.2 中子通率計數量測

經燃料再照射步驟之後（如5.3.1.1節中所述），將其上佈置了覆錒及未覆錒金線的壓克力棒取出 THOR 爐心，待放置於水池中冷卻約二天，使極短半衰期的活化產物衰減之後，取出照射過的覆錒金線及未覆錒金線，再使用核輻射度量實驗室中的偵檢系統進行金線之計數量測，以得到燃料再照射時的中子通率。

在進行金線計數時，計數量測時間為8分鐘，計數統計誤差皆控制在1%以下，偵檢器無感時間則控制在3%以下。

### 5.3.1.3 分裂產物計數量測

依照5.3.1.1節所述之程序，在 TRIGA 燃料於 THOR 中以100 kW 的功率照射4小時後，將其移至 THOR 低功率池冷卻約二天，使極短半衰期的分裂產物衰減之後，再將 TRIGA 燃料移至燃料燃耗測定平台（參見圖5.2-10），分別進行4根燃料棒之加馬能譜的計測（參見圖5.2-11、5.2-13），再根據此能譜以分析評估燃料中分裂產物的活度。

於分裂產物的計數實驗，其計數量測時間為15分鐘，計數統計誤差皆控制在1.0%以下，偵檢器無感時間則控制在10%以下。

圖5.3-2為 TRIGA 全新燃料經首次短時間照射後之加馬能譜；圖

5.3-3則為 TRIGA 用過燃料經再照射後之加馬能譜。很明顯地，前者的加馬能譜因照射歷史短，一些半衰期較長的分裂產物（如<sup>137</sup>Cs）皆尚未建立起來，故其能譜不像後者複雜。

### 5.3.2 中子通率評估

TRIGA 燃料再照射時的中子通率，乃依照5.2.2.3節中所述之二群方法來評估，以此方法不僅可得到總中子通率，亦可分別得到其慢中子及快中子通率，並將於後來運用在分裂產物活度的評估與燃料燃耗的分析。

由於 TRIGA 燃料為圓棒狀，且直徑達3.493公分，而先前分析之 MTR 為片狀燃料，其厚度為0.25公分，從中子及加馬遷移觀點而論，前者可視為”厚”的幾何厚度，而後者則可視為”薄”的幾何厚度。也因此燃耗的分析上，TRIGA 燃料會較 MTR 燃料為複雜。舉例而言，在 MTR 燃料照射時，可假設水流通道中與燃料中之中子通率相同，即在水流通道量測到的中子通率可直接視為燃料中的中子通率；但 TRIGA 燃料在照射時，由於燃料本身對中子在燃料棒中的自我屏蔽效應，使得燃料棒中之中子通率明顯地呈一分佈，加上實驗時無法在其內佈置金線，以直接地量測中子通率並得到其實際的分佈，因此在水流通道量測到的中子通率，必須經過修正後，方能得到燃料中的中子通率。這些問題的解決，將對分析結果有顯著的影響。

### 5.3.3 分裂產物特性分析

在同位素中，共有800多種的分裂產物，然而基於實驗的需求考量，從這眾多的分裂產物當中，僅有少部分合適的分裂產物常被選擇作為加馬能譜分析指標，以進行燃料燃耗之非破壞性檢測分析。表5.3-1列出這些分裂產物或其子核種的半衰期、能峰值、及分枝百分比等特性參數。

本文中，主要是希望建立以短半衰期分裂產物作為指標，利用偵測 TRIGA 用過燃料中經再照射後所重新建立起之短半衰期分裂產物的活度，以進行燃料之燃耗研究。此一方法的特色是可以在燃料過去照射歷史完全欠缺的情形下，仍能推算出燃料之燃耗值。基於以上研究的需要考量，在選擇分裂產物作為分析指標時，主要根據以下幾項原則：

- (1) 加馬能量大。
- (2) 半衰期短（但不可太短）。
- (3) 獨立分裂產率（independent fission yield）高或累積分裂產率高。
- (4) 中子吸收截面低，可忽略因中子吸收所消耗之影響。

(5) 分裂產物因溫度改變造成的擴散效應小或是沒有。

綜合以上考量，乃選擇 $^{97}\text{Zr}$  (16.90小時) /  $^{97}\text{Nb}$  (1.20小時)、 $^{132}\text{I}$  (2.30小時) 及  $^{140}\text{La}$  (40.27小時) 等短半衰期分裂產物，為燃耗分析的主要指標。表5.3-2、5.3-3分別列出本文指標分裂產物的衰減鏈 (decay series) 及特性參數 (主要能峰分及分枝百分比)。

以上所敘述利用偵測短半衰期分裂產物活度，進行燃耗研究之實驗程序與分析流程，大致上可分為兩部分：一為燃料中分裂產物活度的分析；另一為中子通率的分析。圖 5.3-4 為其簡單的程序歸納與流程說明。



表5.3-1 常用來進行非破壞性加馬能譜燃耗分析之分裂產物

分裂產物	半衰期 <sup>10</sup>	分裂產率(%) <sup>11</sup>		主要能峰(keV)與(分枝百分比%) <sup>10</sup>
		<sup>235</sup> U	<sup>239</sup> Pu	
<sup>95</sup> Nb	35.0 day	6.49	4.89	765.8(99.9)
<sup>95</sup> Zr	64.03 day	6.50	4.89	724.2(43.7), 756.7(55.6)
<sup>97</sup> Zr/	16.90 hr/	6.00	5.37	743.4(98.0)
<sup>97</sup> Nb	72.1 min	6.01	5.45	657.9(98.5)
<sup>103</sup> Ru	39.25 day	3.03	6.95	497.3(89.5), 610.3(5.64)
<sup>106</sup> Ru/	371.6 day/	0.40	4.29	511.9(20.7), 621.9(9.81), 1050.3(1.50)
<sup>106</sup> Rh	29.8 s	9.56×10 <sup>-3</sup>	0.55	
<sup>132</sup> Te/	3.26 day/	4.28	5.20	228.2(88.1)
<sup>132</sup> I	2.30 hr	0.00	0.11	667.7(99.0), 772.6(76.4), 954.6(18.1)
<sup>134</sup> Cs	2.06 yr	1.27×10 <sup>-5</sup>	9.89×10 <sup>-4</sup>	569.3(15.4), 604.7(97.6), 795.8(85.4), 1038.5(1), 1167.9(1.80), 1365.1(3.04)
<sup>137</sup> Cs	30.17 yr	6.27	6.73	661.6(85.1)
<sup>140</sup> Ba/	12.79 day	6.32	5.62	537.3(24.4)
<sup>140</sup> La	40.27 hr	4.8×10 <sup>-4</sup>	1.28×10 <sup>-2</sup>	328.8(20.7), 487.0(45.9), 815.8(23.6), 925.2(7.05), 1596.5(95.4)
<sup>144</sup> Ce/	284.9 day/	5.41	3.74	695.5(1.34), 1489.2(0.27),
<sup>144</sup> Pr	17.3 min	0.00	4.06×10 <sup>-5</sup>	2185.7(0.70)
<sup>154</sup> Eu	8.8 yr	3.44×10 <sup>-8</sup>	7.49×10 <sup>-7</sup>	723.3(19.7), 873.2(11.5), 996.3(10.3), 1004.8(17.9), 1274.5(35.5)
<sup>156</sup> Eu	15 day	0.013	1.69×10 <sup>-3</sup>	646.3(6.67), 811.8(10.3), 1065.1(5.23), 1153.5(7.21), 1230.7(8.48)

表5.3-2 指標分裂產物衰減鏈

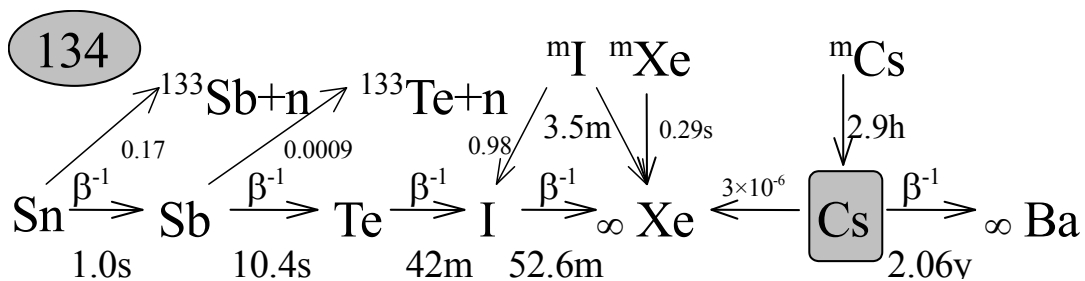
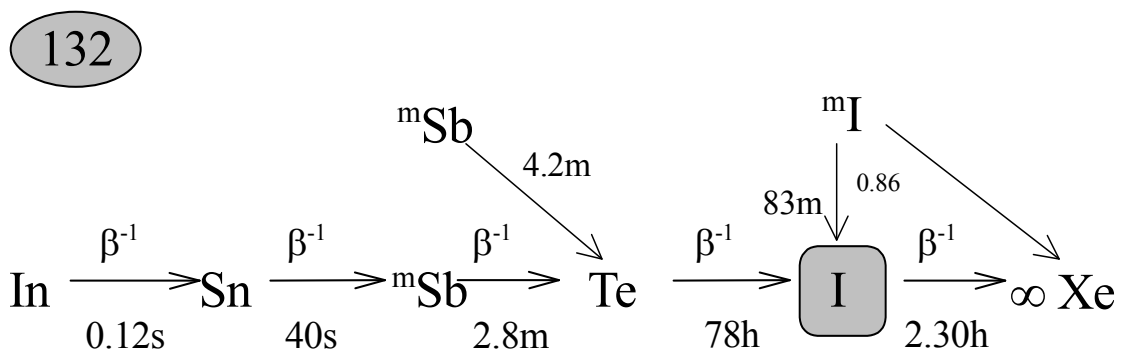
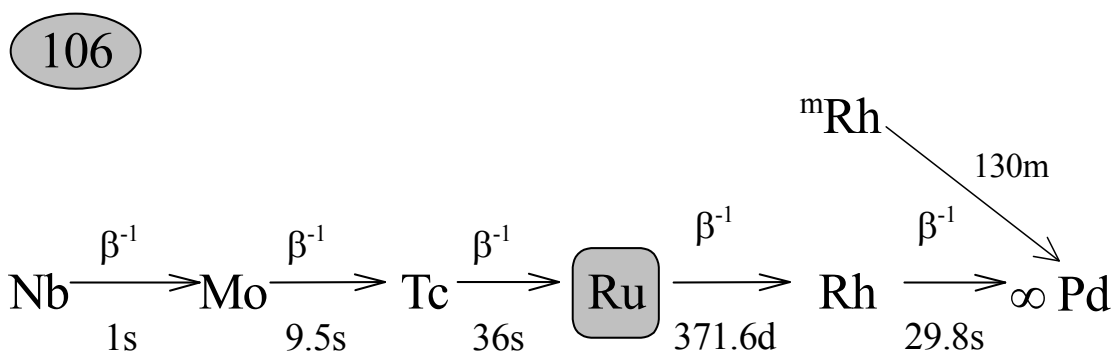
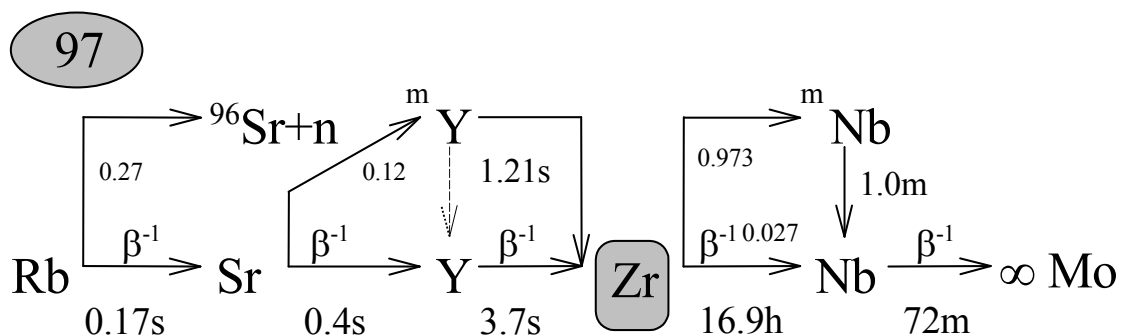


表5.3-2 指標分裂產物衰減鏈（續）

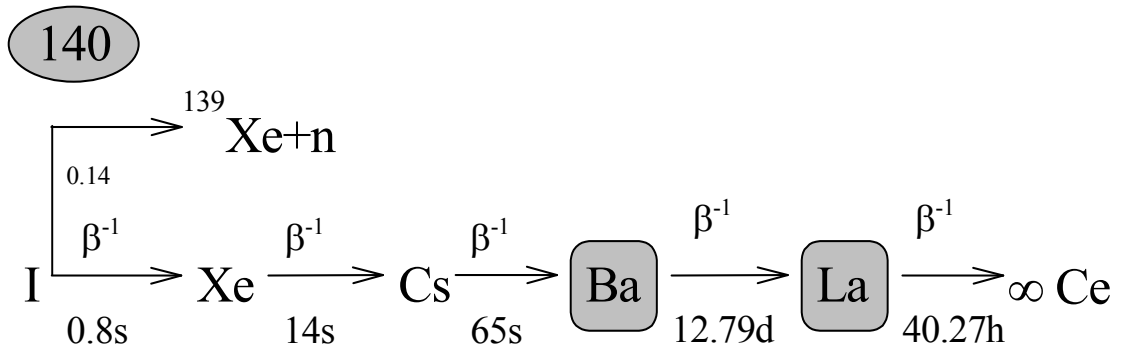
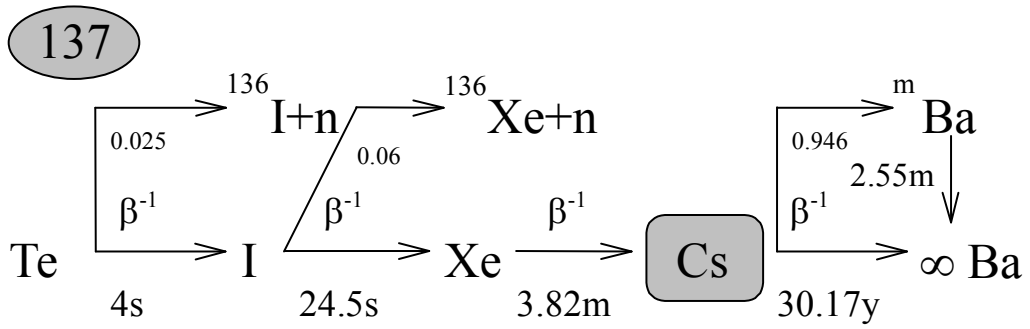
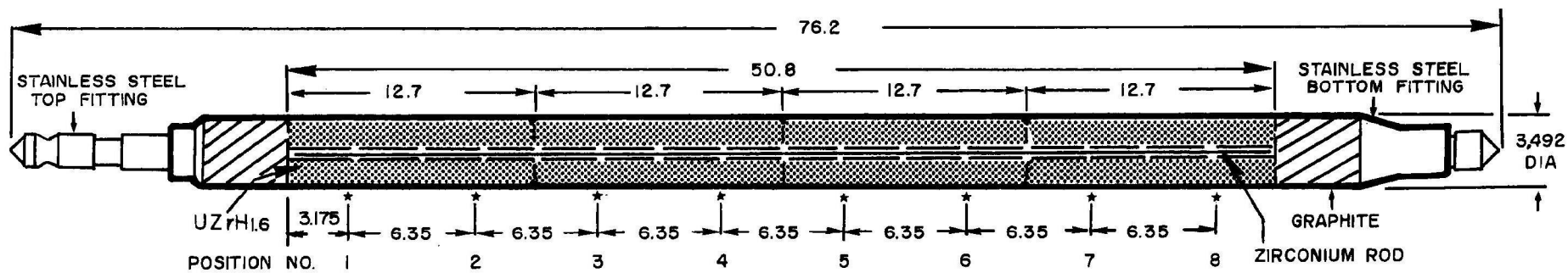


表5.3-3 燃耗分析指標分裂產物或活化產物的特性參數

分裂產物	分裂產率 (%) <sup>11</sup>		半衰期 <sup>10</sup>	吸收截面(b) <sup>12, 13</sup>	共振積分(b) <sup>12, 13</sup>
	<sup>235</sup> U	<sup>239</sup> Pu			
<sup>96</sup> Zr	6.26	5.07	∞	0.0229±0.0010	5.3±0.3
<sup>97</sup> Zr	6.00	5.37	16.90hr	-	-
<sup>97</sup> Nb	6.01	5.45	72.1m	-	-
<sup>106</sup> Ru	0.40	4.29	1.02yr	0.146±0.045	2.0±0.6
<sup>132</sup> Te	4.28	5.20	3.26d	0.002*	0.005*
<sup>132</sup> I	0.00	0.109	2.3hr	-	-
<sup>133</sup> Cs	6.70	6.98	∞	29±0.033	437*
<sup>134</sup> Cs	1.27×10 <sup>-5</sup>	9.89×10 <sup>-4</sup>	2.06yr	140±12	54.2*
<sup>137</sup> Cs	6.27	6.73	30.17yr	0.11±0.033	0.488*
<sup>139</sup> La	6.31	5.62	∞	8.93±0.04	11.8±0.8
<sup>140</sup> La	4.8×10 <sup>-4</sup>	1.28×10 <sup>-2</sup>	40.27hr	2.7±0.3	69±4
<sup>140</sup> Ba	6.32	5.62	12.79d	1.6±0.3	13.6±1.4
<sup>198</sup> Au	-	-	64.80hr	98.65±0.09	1550±28

\*取自 ENDF/B-VII。



UNIT: cm

圖 5.3-1 燃料棒之軸向量測點位置

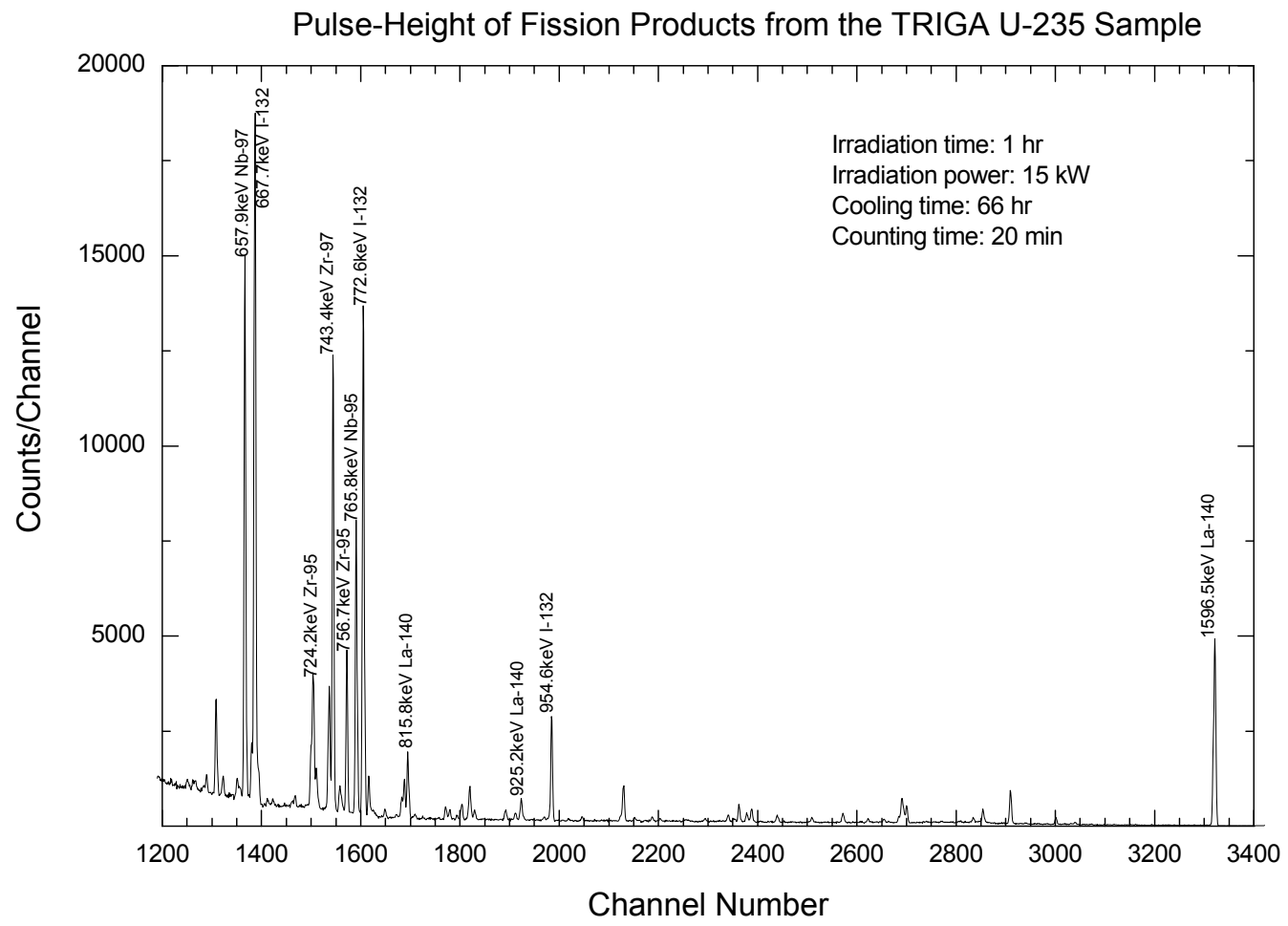


圖 5.3-2 全新 TRIGA 燃料之加馬能譜

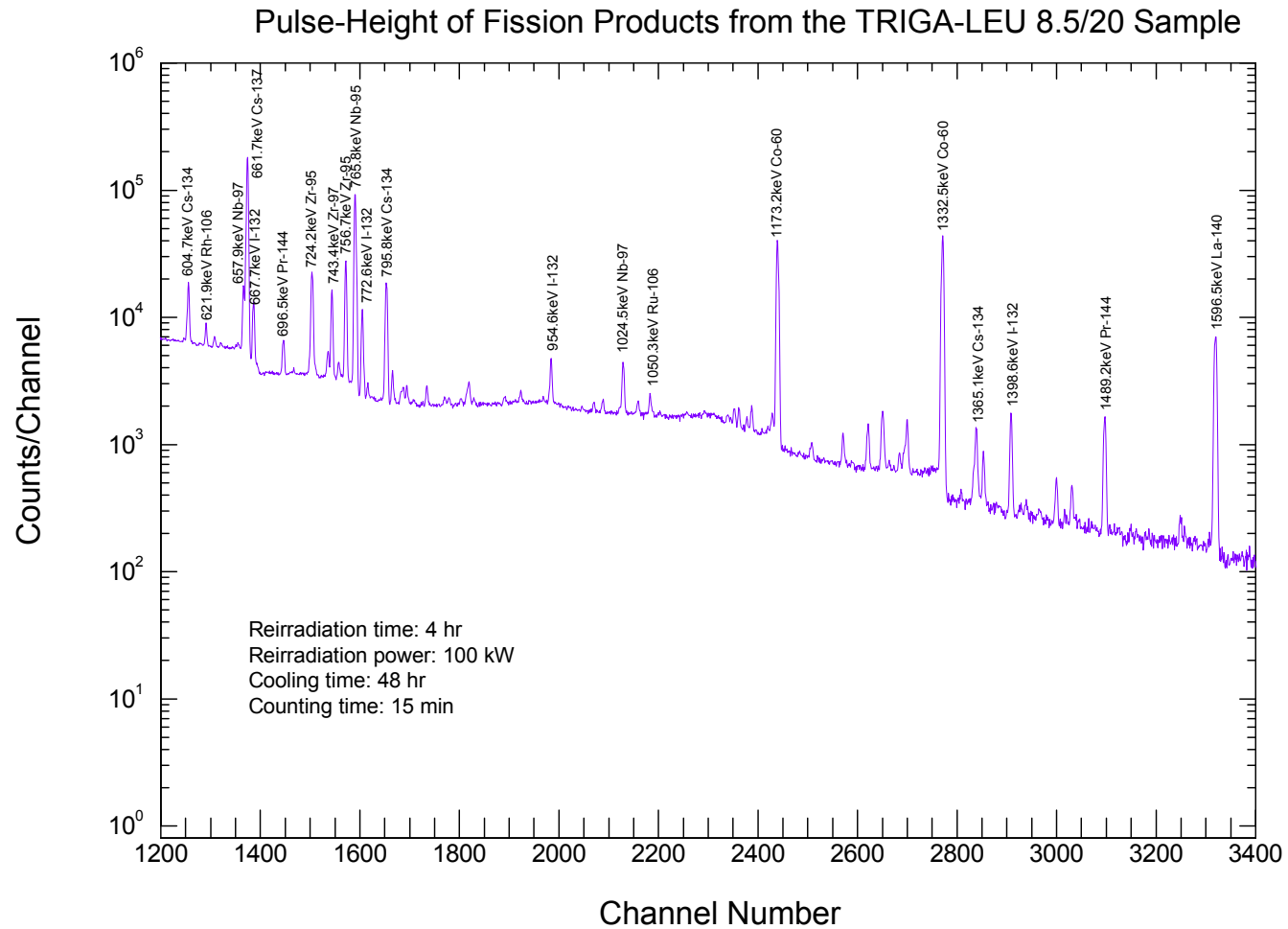


圖 5.3-3 用過 TRIGA 燃料之加馬能譜

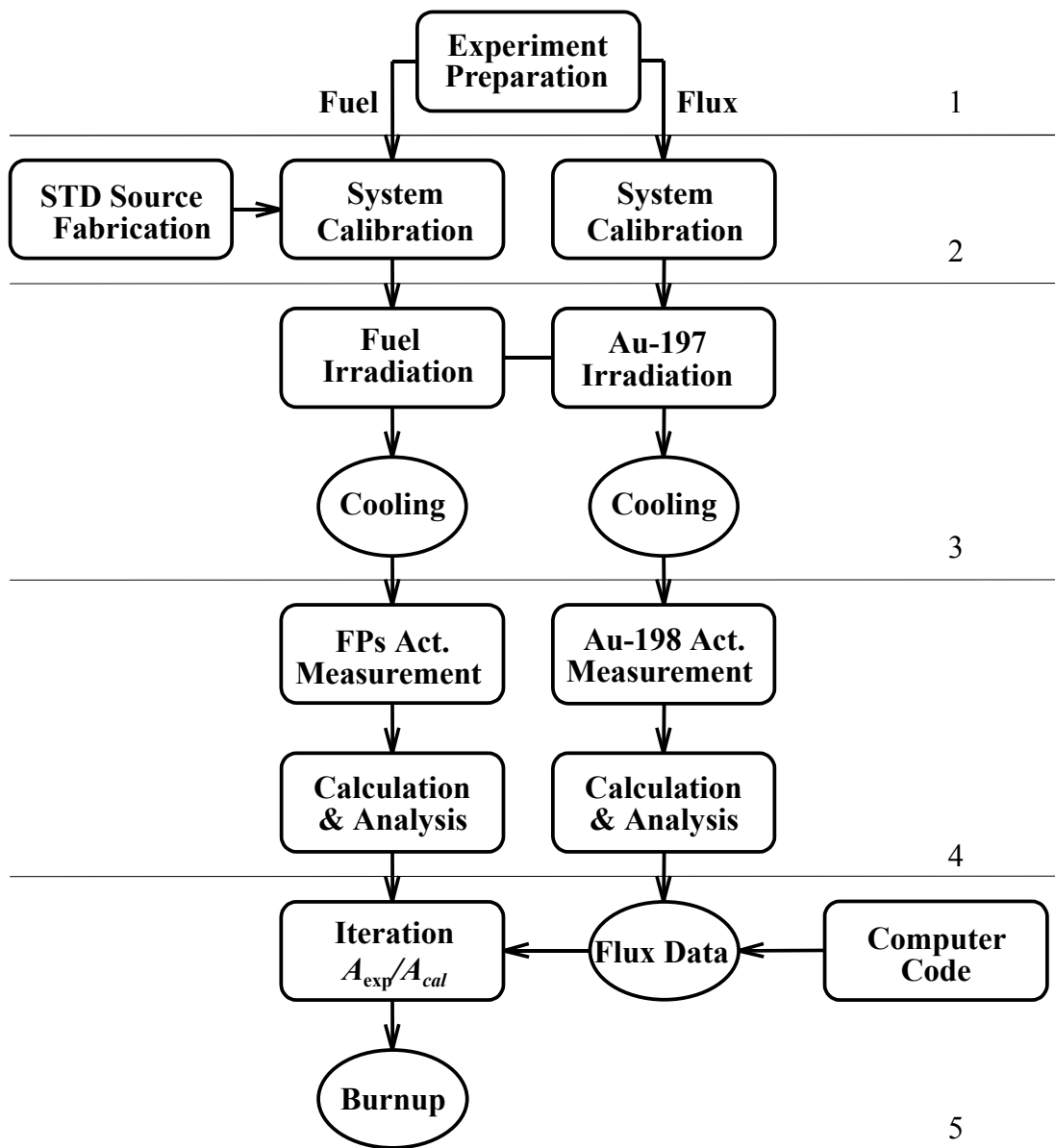


圖 5.3-4 TRIGA 燃料燃耗量測評估流程



## 5.4 燃耗量測分析

### 5.4.1 TRIGA 燃料晶格計算

如5.3.2節所述，由於 TRIGA 燃料為圓棒狀，且直徑達3.493公分，而過去所分析之 MTR 燃料為片狀，厚度僅為0.25公分。從中子及加馬遷移觀點而論，前者可視為”厚”的幾何厚度，而後者的可視為”薄”的幾何厚度，故在 MTR 燃料照射時，可假設水流通道量測到的中子通率為燃料中的中子通率；但 TRIGA 燃料在照射時，由於燃料本身對中子在燃料棒中的自我屏蔽吸收效應顯著，使得燃料棒中之中子通率會在徑向明顯地呈一分佈。但在實驗時無法在其內佈置金線，以量測並得到實際的中子通率分佈。因此於實驗時，在水流通道量測到的中子通率，必須經過修正後，方能得到燃料中的中子通率。本研究所採取的方法是利用燃料晶格計算，藉此以得到燃料棒內外中子通率之間的關係，並應用於後來的燃耗分析，以決定燃料的燃耗值。

#### 5.4.1.1 計算處理流程

圖5.4-1為本文中之燃料晶格計算處理流程。首先以 NJOY 核截面數據處理程式，處理 ENDF/B-VII 的核截面數據，再利用 WIMS

燃料晶格計算程式作晶格計算，而後再將所得的中子能譜運用於燃料分析。

#### 5.4.1.2 NJOY 核截面數據處理程式

NJOY 核數據處理程式乃利用 ENDF/B 核數據庫來處理中子與光子截面，並產生似點 (pointwise) 和多群 (multigroup) 截面組。此程式是由幾個不同功能的模組 (module) 組合而成，各模組不互相影響可拆開獨立執行。本文中，僅利用 NJOY 來處理燃料內的氫核。一般燃料很少用到鈾之氫鍍合金，而 TRIGA 燃料卻獨特的由 U-ZrH<sub>1.6</sub>合金製作而成，但在 WIMS 程式截面資料庫中的氫核數據，乃是針對水中的氫原子計算所得的，故本文在作晶格計算時，燃料內所用的氫核數據必須重新加以計算並產生。

##### (1) 氫核數據處理

在 WIMS 原始資料庫中的氫核數據是針對水中氫原子所產生的，但中子截面能群在熱能區內相當複雜，這和散射物的組成有關。因此在燃料區執行晶格計算時，並不能簡單的應用原始的氫核截面數據，必須以 NJOY 核數據處理程式另行計算以得到在 U-ZrH<sub>1.6</sub>中的氫核截面數據。

執行 NJOY 程式時，首先讀入 ENDF/B-VII 中的氫核數據，再利用 ENDF/B-VII 輸入 ZrH 之散射定律來修正熱中子截面，於新的氫數據庫產生並經格式轉換後，再以 WIMS 程式，利用所得之截面庫，對 TRIGA 燃料作晶格計算（參閱圖5.4-1、圖5.4-2），並進而運用此計算結果於燃料燃耗之分析。

## (2) 散射定律 (Scattering Law)

由於熱中子截面和溫度以及散射物質之化學狀態鍵結的方式有關，因此其在熱能區的計算顯得相當複雜。

在 ENDF 資料庫中，儲存有彈性與非彈性散射的和數據。在彈性散射中，不論干涉 (coherent) 或非干涉 (incoherent) 均以 Legendre  $P_0$  到  $P_5$  來貯存數值；而非彈性散射，則利用非干涉近似法 (incoherent approximation) 計算，以散射定律  $S(\alpha, \beta)$  來貯存。

散射定律， $S(\alpha, \beta)$ ，定義如下：

$$\sigma_s^{inc}(E \rightarrow E', \mu) = \sigma_b \frac{1}{4\pi T} \sqrt{\frac{E'}{E}} e^{-\beta/2} S(\alpha, \beta) \quad (5.4-1)$$

其中

$E$ ：散射前的中子能量

$E'$ ：散射後的中子能量

$\mu$ ：實驗室座標系統中的散射夾角餘弦值

$\sigma_b$ ：束縛原子 (bound atom) 散射截面

$S(\alpha, \beta)$ ： $\alpha, \beta$  二變數的顯函數 (explicit function)

$T$ ：絕對溫度

$\alpha, \beta$  二變數均為無因次 (dimensionless) 之變數，其分別代表動量及能量的轉移量，定義為：

$$\alpha \equiv \frac{E' + E - 2\mu\sqrt{E'E}}{AKT}, \quad \beta \equiv \frac{E' - E}{KT} \quad (5.4-2)$$

其中

$K$ ：波茲曼常數 (Boltzmann's constant)

$A$ ：散射核對中子質量的比值

通常  $\sigma_b$  值是以特徵自由截面 (characteristic free cross section)  $\sigma_f$  來表示：

$$\sigma_b = \sigma_f \frac{(A+1)^2}{A^2} \quad (5.4-3)$$

對於散射物中束縛原子的  $S(\alpha, \beta)$  值計算非常地困難，因為它和散射物的詳細化學結構有關。例如對液體緩和劑 (moderator) 如水而言，要考慮水分子的轉動 (rotation) 與移動 (translation)；對於多晶體 (polycrystalline) 物質如石墨而言，則需要考慮晶格間的振動 (vibration)。因此針對不同的散射物，產生許多的近似法來計算  $S(\alpha, \beta)$  值。

在 ENDF 中，對於一些重要的核種，會依不同的溫度與  $\beta$  值，將  $S(\alpha, \beta)$  對  $\alpha$  值排列成表，而儲存於第七檔案中 (file7)。當執行 NJOY 的 THERMR 模組時，會從其中得到所需的散射定律。對於中間溫度的熱截面是利用兩溫度之截面來內插求值，而非先內插溫度再求其截面。

若是非重要的核種，THERMR 模組則將之視為自由氣體 (free gas)，由程式自行運算求散射定律  $S(\alpha, \beta)$ ：

$$S(\alpha, \beta) = \frac{1}{\sqrt{4\pi\alpha}} e^{-(\alpha^2 + \beta^2)/4\alpha} \quad (5.4-4)$$

再由 (5.4-1) 式求得散射截面。

### 5.4.1.3 燃料晶格計算

在燃料晶格的計算上，所使用之程式為英國 AEEW 於1960年代所發展出來的 WIMS (Winfrith Improved Multi-group Scheme) 晶格計算程式。該程式主要是以遷移理論 (transport theory) 應用於多群的晶格計算，可以輸入均質 (homogeneous) 或是異質 (heterogeneous) 材料，亦可以輸入不同的幾何形狀，如片狀棒狀，或是棒束 (cluster)。其數據庫包括了一般反應器可能用到的九十多種材料。

WIMS 截面數據庫共分六十九個能群，大致又可將能群分為三大部分：(1) 快中子群 (fast group)：9.118 keV 到 10 MeV，共 14 群。(2) 中速中子群 (epithermal group)：4 eV 到 9.118 keV，共 13 群。(3) 熱中子群 (thermal group)：4 eV 以下，共 42 群。熱中子群上限能量是考慮在反應器中熱中子產生向上彈射 (upscattering) 的最高能量。中速中子群又稱為共振中子群 (resonance group)，此區間是重元素發生共振的區域，處理此區間截面時，需考慮自我屏蔽效應。WIMS 數據中將重元素共振群以共振積分的型式寫成溫度與背景截面 (background cross section) 的表格。其各群能量結構詳見表 5.4-1，圖 5.4-3 則為 WIMS 之計算流程。由後來燃耗分析皆以二群方式進行，故在計算時亦將基本能群結構 69 群的截面數據縮陷 (collapsed) 成二群結果。

依5.4.1.2節的敘述，在執行燃料晶格計算時，並不能簡單的應用原始的氫核數據，必須對 U-ZrH<sub>1.6</sub> 中氫原子的核數據重新計算處理，以產生新的氫截面資料庫。為了得到此一新的氫截面資料庫，我們利用 NJOY 程式讀入 ENDF/B-V 中的氫核數據，並輸入 ENDF/B-VII 中之 ZrH 散射定律以修正熱中子截面，經執行運算後產生所要的氫截面資料，再經轉換並加入 WIMS 截面資料庫，以提供 WIMS 程式用來進行 TRIGA 燃料晶格的計算。柱狀化之等效晶格包括一燃料棒及其周圍之水緩和劑，其單元之等效半徑為2.193公分（參考圖 5.2-6）。

圖5.4-4是 WIMS-D4對 TRIGA-LEU 8.5/20及 TRIGA-LEU 20/20 燃料作單一晶格計算所得之快中子、慢中子及總中子通率的徑向分佈情形。對單一晶格而言，燃料區內包含所有的可裂物(fissionable)，所以在該區的快中子通率最大；而20/20型 TRIGA 燃料的<sup>235</sup>U 含量較8.5/20型的燃料多，因此前者的快中子通率高於後者。當快中子進入燃料中心的鈾棒之後，受到鈾熱化的影響，通率會往下降；快中子在燃料外層緩和劑區域時，受到水之減速影響，造成快中子通率逐漸下降，直到接近燃料晶格邊緣，受到鄰近晶格的影響，快中子通率又會稍微上升。熱中子通率的分佈趨勢則與快中子相反，這是因

為所有熱中子的產生皆由快中子之減速而造成。此外，由於20/20型的 $^{235}\text{U}$ 含量多於8.5/20型燃料，加上前者有Er可燃毒物的吸收效應，故20/20型 TRIGA 燃料的熱中子通率遠較8.5/20燃料的為低，相對而言，20/20型燃料亦顯示有較明顯的空間屏蔽效應。

圖5.4-5則是 WIMS-D4對燃料作晶格計算所得的常態化中子通率對能量分佈情形。圖中亦顯示20/20型燃料的高能區中子較8.5/20型的多，即其中子能譜較8.5/20型的硬。

#### 5.4.1.4 使用的計算機

核數據處理程式 NJOY，是利用清華大學工科所的 IBM-340 工作站來執行計算；另外晶格計算程式 WIMS，歷年來曾經過多次的修改，本文所使用的為 RSICC 的 WIMS-D4 之 PC 版本，經過程式安裝及測試後，可以在 PC 上運用其進行燃料的晶格計算。

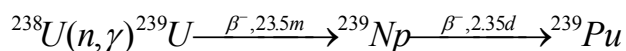


## 5.4.2 $^{239}\text{Pu}$ 之產生

MTR 屬高濃縮鈾燃料，其 $^{235}\text{U}$  起初濃度為93%，即其 $^{238}\text{U}$  的含量僅有7%，故先前在進行 MTR 燃料燃耗分析時，可忽略 $^{239}\text{Pu}$  之產生所造成的影響。但由於 TRIGA 燃料屬低濃縮鈾燃料，其 $^{235}\text{U}$  濃度為19.9%， $^{238}\text{U}$  的濃度佔80.1%，因此在決定 TRIGA 用過燃料的燃耗時， $^{239}\text{Pu}$  之產生將對燃耗的分析造成較顯著的影響。

在類似於 THOR 使用低濃縮鈾燃料的核反應器，最初所建立之分裂產物的來源，主要有來自熱中子所造成的 $^{235}\text{U}$  分裂以及快中子所造成的 $^{238}\text{U}$  分裂（通常後者可忽略），但隨著燃耗的增加，燃料中所堆積的 $^{239}\text{Pu}$  含量也隨之增加，造成其對熱中子分裂的貢獻程度也相形的增加，故在評估 TRIGA 用過燃料分裂產物的活度時，除了需要考慮 $^{235}\text{U}$  分裂所產生的分裂產物之外，尚需要考慮 $^{239}\text{Pu}$  分裂的部分。

$^{239}\text{Pu}$  之產生是因 $^{238}\text{U}$  經中子捕獲反應產生 $^{239}\text{U}$ ， $^{239}\text{U}$  經 $\beta$ 蛻變成 $^{239}\text{Np}$  中間子核，而 $^{239}\text{Np}$  再經 $\beta$ 蛻變成 $^{239}\text{Pu}$ ，其反應式可表示如下：



在運轉照射之下， $^{238}\text{U}$  含量隨時間變化的計算式，可簡單表示

如下：

$$\frac{dN_{28}(t)}{dt} = -\sigma_{28}^f \phi N_{28} - \sigma_{28}^\gamma \phi N_{28} = -\sigma_{28}^a \phi N_{28} \quad (5.4-5)$$

$$N_{28}(t) = N_{28}(0) e^{-\sigma_{28}^a \phi t} \quad (5.4-6)$$

$^{239}\text{Pu}$  含量隨時間變化的計算式，其分析推導則表示如下：

$$\frac{dN_{29}(t)}{dt} = \sigma_{28}^\gamma \phi N_{28} - \lambda_{29} N_{29} - \sigma_{29}^a \phi N_{29} \quad (5.4-7)$$

$$N_{29}(t) = N_{29}(0) e^{-\lambda_{29}^* t} + \sigma_{28}^\gamma \phi N_{28}(0) \frac{e^{-\sigma_{28}^a \phi t} - e^{-\lambda_{29}^* t}}{\lambda_{29}^* - \sigma_{28}^a \phi} \quad (5.4-8)$$

$$\frac{dN_{39}(t)}{dt} = \lambda_{29} N_{29} - \lambda_{39} N_{39} - \sigma_{39}^a \phi N_{39} \quad (5.4-9)$$

$$N_{39}(t) = N_{39}(0) e^{-\lambda_{39}^* t} + \lambda_{29} \cdot \left\{ N_{29}(0) \frac{e^{-\lambda_{29}^* t} - e^{-\lambda_{39}^* t}}{\lambda_{39}^* - \lambda_{29}^*} + \frac{\sigma_{28}^\gamma \phi N_{28}(0)}{\lambda_{29}^* - \sigma_{28}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{28}^a \phi t} - e^{-\lambda_{39}^* t}}{\lambda_{39}^* - \sigma_{28}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_{29}^* t} - e^{-\lambda_{39}^* t}}{\lambda_{39}^* - \lambda_{29}^*} \right] \right\} \quad (5.4-10)$$

$$\frac{dN_{49}(t)}{dt} = \lambda_{39} N_{39} + \sigma_{39}^\gamma \phi N_{39} - \lambda_{49} N_{49} - \sigma_{49}^a \phi N_{49} \quad (5.4-11)$$

$$N_{49}(t) = N_{49}(0) e^{-\lambda_{49}^* t} + \lambda_{39} N_{39}(0) \frac{e^{-\lambda_{39}^* t} - e^{-\lambda_{49}^* t}}{\lambda_{49}^* - \lambda_{39}^*} + \lambda_{29} \lambda_{39} \cdot \left\{ \frac{N_{29}(0)}{\lambda_{39}^* - \lambda_{29}^*} \left( \frac{e^{-\lambda_{29}^* t} - e^{-\lambda_{49}^* t}}{\lambda_{49}^* - \lambda_{29}^*} - \frac{e^{-\lambda_{39}^* t} - e^{-\lambda_{49}^* t}}{\lambda_{49}^* - \lambda_{39}^*} \right) + \frac{\sigma_{28}^\gamma \phi N_{28}(0)}{\lambda_{29}^* - \sigma_{28}^a \phi} \left[ \frac{1}{\lambda_{39}^* - \sigma_{28}^a \phi} \left( \frac{e^{-\sigma_{28}^a \phi t} - e^{-\lambda_{49}^* t}}{\lambda_{49}^* - \sigma_{28}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_{39}^* t} - e^{-\lambda_{49}^* t}}{\lambda_{49}^* - \lambda_{39}^*} \right) - \frac{1}{\lambda_{29}^* - \sigma_{28}^a \phi} \left( \frac{e^{-\lambda_{29}^* t} - e^{-\lambda_{49}^* t}}{\lambda_{49}^* - \lambda_{29}^*} - \frac{e^{-\lambda_{39}^* t} - e^{-\lambda_{49}^* t}}{\lambda_{49}^* - \lambda_{39}^*} \right) \right] \right\} \quad (5.4-12)$$

其中

$\sigma$ ：微觀截面；

$\phi$ ：中子通率

$\lambda$ ：衰變常數

$N$ ：原子數密度

$N(0)$ ：起始原子數密度

$$\lambda_{29}^* = \lambda_{29} + \sigma_{29}^a \phi$$

$$\lambda_{39}^* = \lambda_{39} + \sigma_{39}^a \phi$$

$$\lambda_{49}^* = \lambda_{49} + \sigma_{49}^a \phi。$$

以上 (5.4-5) ~ (5.4-12) 式中，下標28、29、39、49分別代表<sup>238</sup>U、<sup>239</sup>U、<sup>239</sup>Np、<sup>239</sup>Pu的核數據常數；上標 $f$ 、 $\gamma$ 、及 $a$ 分別代表分裂、中子捕獲、及吸收。

為瞭解在 TRIGA 燃料元件燃耗時，燃料中<sup>239</sup>Pu及其他超鈾元素之產生與堆積，運用先前介紹之 WIMS-D4晶格計算程式作 TRIGA 燃料晶格的燃耗計算與分析。經由執行 WIMS-D4程式計算之後，得到表5.4-2、5.4-3的結果，表中分別顯示是 TRIGA-LEU 8.5/20、

TRIGA-LEU 20/20燃料燃耗過程中之易裂材(fissile)及可孕材(fertile)元素間的存量關係；其結果亦表示於圖5.4-6、5.4-7中。由於20/20型TRIGA燃料的 $^{235}\text{U}$ 含量約為8.5/20型的2.35倍並有 $^{167}\text{Er}$ 可燃毒物的關係，故其能譜較硬，另外加上其中的 $^{238}\text{U}$ 含量亦約為8.5/20燃料的2.35倍，因此造成快中子與 $^{238}\text{U}$ 的反應速率較高，這使得兩者在同樣燃耗值之情形下，20/20型TRIGA燃料中所產生 $^{239}\text{Pu}$ 的相對濃度也較高，由圖5.4-8、5.4-9中可得知此比較結果。經由以上晶格計算所得的結果，可以得到 $^{235}\text{U}$ 消耗（即燃耗）與 $^{239}\text{Pu}$ 產生之間的關係，並將運用在後來推導燃耗值的分析上，同時也可進一步瞭解 $^{239}\text{Pu}$ 之產生對燃耗所造成的影響。

### 5.4.3 燃料之空間自我衰減因子

燃料之空間自我衰減因子，主要是用來修正分裂產物所產生之加馬射線為燃料本身所吸收的部分。此一因子之計算可根據燃料棒的衰減係數及分裂產物在燃料中的分佈，而後者直接與分裂產物的活度（即分裂速率）相關。由5.4.1.3節以 WIMS 作燃料晶格計算的結果顯示，TRIGA-LEU 8.5/20及 TRIGA-LEU 20/20燃料之分裂速率分佈，可分別以函數  $(1.6-0.6 \cos \frac{\pi r}{2a})$  及  $(1.9-0.9 \cos \frac{\pi r}{2a})$  表示，而燃料的自我衰減因子其計算式可表示如下：

$$f = \frac{\int_{-a}^a \int_{-a}^{2\sqrt{a^2-x^2}} S e^{-\mu(a+r)} dr dx}{\int_{-a}^a \int_{-a}^{2\sqrt{a^2-x^2}} S dr dx} \quad (5.4-13)$$

其中

$f$ ：自我衰減因子

$\mu$ ：自我衰減因子

$r$ ：與燃料中心的距離

$a$ ：燃料棒之半徑

$S$ ：分裂產物活度分佈

$x$  :  $x$  軸方向之距離

根據以上的分佈並將其代入 (5.4-13) 式，並使用計算程式，對燃耗分析指標產物所在之加馬能量範圍內 (600-1600 keV) 進行燃料自我衰減因子的計算，其結果分別顯示於表5.4-4、表5.4-5，同時也表示於圖5.4-10。由表5.4-4及表5.4-5顯示，在657.9、743.4、667.7、772.6、815.8、及1596.5 keV 的加馬能量，對8.5/20燃料而言，空間自我衰減因子分別為0.560、0.587、0.563、0.596、0.611、0.702；對20/20燃料而言，則分別為0.516、0.553、0.520、0.563、0.578、0.680。

但考慮在燃料實際照射的情況下，燃料中的中子通率分佈可能會與燃料晶格的計算結果有偏差產生，故另外進行各種不同分佈情形下之空間自我屏蔽因子的計算，以分析評估此一因素所造成與晶格計算兩者之間可能的誤差範圍。燃料中假設的活度分佈可簡單的用通式  $S=S_0 \left( C_2 - (C_2 - C_1) \cos \frac{\pi r}{2a} \right)$  表示，根據不同的分佈 (即不同的  $C_1$ 、 $C_2$  值)，再經程式計算可得  $f$  值。

考慮活度分佈為對稱 ( $C_1$  值為1)，燃料中分裂產物徑向的活度分佈分別是  $S=S_0 \left( 1.25 - 0.25 \cos \frac{\pi r}{2a} \right)$ 、 $S=S_0 \left( 1.5 - 0.5 \cos \frac{\pi r}{2a} \right)$ 、 $S=S_0 \left( 2 - \cos \frac{\pi r}{2a} \right)$ 、 $S=S_0 \left( 2.25 - 1.25 \cos \frac{\pi r}{2a} \right)$  或  $S=S_0 \left( 2.5 - 1.5 \cos \frac{\pi r}{2a} \right)$ ，經計算所得到的  $f$  值結果分別列於表5.4-4及表5.4-5中。表中也顯示各  $f$

值與晶格計算分佈  $(1.6-0.6 \cos \frac{\pi r}{2a})$  及  $(1.9-0.9 \cos \frac{\pi r}{2a})$  所得之結果的  
偏離程度，對8.5/20燃料而言，偏差範圍在0.2~3.0%之間；對20/20  
燃料而言，則在0.2~3.4%之間。

#### 5.4.4 分裂產物活度評估

TRIGA 燃料元件在 THOR 爐心經照射過後，利用圖5.2-10的燃料燃耗量測定平台進行<sup>97</sup>Zr/<sup>97</sup>Nb、<sup>132</sup>I、及<sup>140</sup>La 等指標分裂產物之計數，使用 EG&G 分析軟體  $\gamma$ -vision 分析加馬能譜指標能峰下的面積，得到淨計數值，再經系統效率及衰減因子的修正計算，可求得指標分裂產物的實驗活度，其公式可以表示如下：

$$A_{\text{exp}} = C / \varepsilon \times \gamma \times f \quad (5.4-14)$$

其中

$A_{\text{exp}}$ ：分裂產物的實驗活度

$C$ ：加馬能峰下之面積淨計數 (#/sec)

$\varepsilon$ ：在某一特定加馬能量下的系統絕對效率

$\gamma$ ：加馬分枝百分比強度

$f$ ：燃料之空間自我衰減因子

上式中的  $\varepsilon$  值，乃是利用列於表5.2-4的  $\varepsilon_1$  值作曲線符合 (curve fitting) 後所得到之關係式 (圖5.2-14)，分別求得在657.9、743.4、667.7、772.6及1596.5 keV 加馬能量下的系統絕對效率；不同加馬能

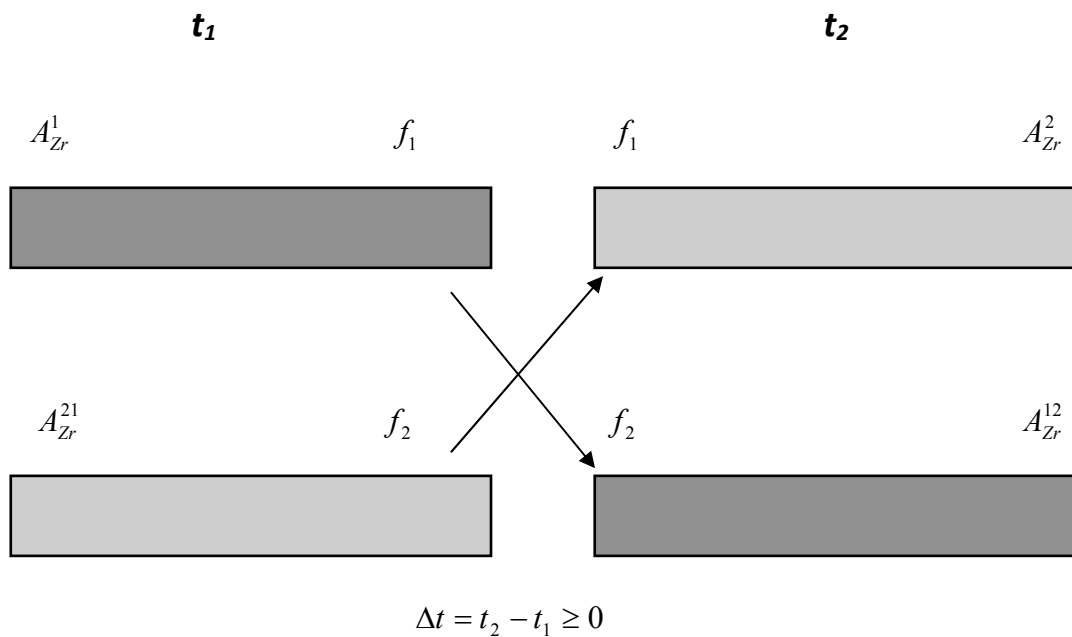


量的加馬分枝百分比強度 $\gamma$ 值，可由表5.3-3得到；燃料之空間自我衰減因子 $f$ 值則分別列於表5.4-4及表5.4-5。由於實驗時，是在8個軸向位置量測燃料元件（2×2燃料棒束）的活度，每次量到的是兩根燃料棒之活度加成，故每根燃料棒的活度乃是經矩陣計算所得到的結果。

其計算將簡單說明於下。

以 $^{97}\text{Zr}$  為例：

如下之簡圖說明，先於 $t_1$ 時間量測第一面，而後將燃料元件翻面於 $t_2$ 時間再作反面量測，



則在不同時間所量得的計數可表示如下：

$$t_1 : C_1 = \gamma \cdot \varepsilon \cdot [f_1 A_{Zr}^1 + f_2 A_{Zr}^{21}] = \gamma \cdot \varepsilon \cdot [f_1 A_{Zr}^1 + f_2 A_{Zr}^2 e^{\lambda_{Zr} \Delta t}]$$

(5.4-15)

$$t_2 : C_2 = \gamma \cdot \varepsilon \cdot [f_1 A_{Zr}^2 + f_2 A_{Zr}^{12}] = \gamma \cdot \varepsilon \cdot [f_2 A_{Zr}^1 e^{-\lambda_{Zr} \Delta t} + f_1 A_{Zr}^2] \quad (5.4-16)$$

(5.4-15)、(5.4-16)式可改寫成以下矩陣形式：

$$AX = B \quad (5.4-17)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} f_1 & f_2 e^{\lambda_{Zr} \Delta t} \\ f_2 e^{-\lambda_{Zr} \Delta t} & f_1 \end{bmatrix} \quad (5.4-18)$$

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (5.4-19)$$

$$B = \begin{bmatrix} C_1 \\ \gamma \cdot \varepsilon \\ C_2 \\ \gamma \cdot \varepsilon \end{bmatrix} \quad (5.4-20)$$

$C_1$ ： $t_1$ 時間所量得的加馬能峰下之面積淨計數 (#/sec)

$C_2$ ： $t_2$ 時間所量得的加馬能峰下之面積淨計數 (#/sec)

$\varepsilon$ ：在某一特定加馬能量下的系統絕對效率

$\gamma$ ：加馬分枝百分比強度

$f_1$ ：上方燃料之空間自我衰減因子

$f_2$ ：下方燃料之空間自我衰減因子

$\lambda_{Zr}$ ： $^{97}\text{Zr}$ 的衰變常數

$A_{Zr}^1$  :  $t_1$ 時間燃料棒1的 $^{97}Zr$ 的活度

$A_{Zr}^{21}$  :  $t_1$ 時間燃料棒2的 $^{97}Zr$ 的活度

$A_{Zr}^2$  :  $t_2$ 時間燃料棒2的 $^{97}Zr$ 的活度

$A_{Zr}^{12}$  :  $t_2$ 時間燃料棒1的 $^{97}Zr$ 的活度

而後再由矩陣計算

$$X=(A)^{-1}B \quad (5.4-21)$$

如此可分別求得兩燃料棒中單位體積的活度值。反之亦可推導  
若先於  $t_2$  時間先量測第一面，將燃料翻面後於  $t_1$  時間再作反面量測  
的情形。其他分裂產物之活度亦可利用類似的方式來推導求得。

表5.4-1 WIMS 能群區間

Energy width	Lethargy Width	能區	群間	能群			
				69群	26群	7群	2群
MeV		快中子能群 MeV					
3.9345	0.49997	10.000-6.0655	1	1	1	1	
2.3865	0.49998	6.0655-3.679	2				
1.448	0.50019	3.679-2.231	3	2			
0.878	0.50013	2.231-1.353	4	3			
0.532	0.49956	1.353-0.821	5	4			
0.321	0.49592	0.821-0.500	6	5			
0.1975	0.50253	0.500-0.3025	7	6	2		
0.1195	0.50260	0.3025-0.183	8	7			
0.072	0.49996	0.183-0.111	9	8			
0.04366	0.49978	0.111-0.06734	10	9			
0.02649	0.49985	0.06734-0.04085	11				
0.01607	0.49987	0.04085-0.02478	12	10			
0.00975	0.49999	0.02478-0.01503	13	11			
0.00591	0.49980	0.01503-0.009118	14	12			
eV		共振能群 eV					
3588.0	0.45198	9118-5530	15	13	3		
2010.9	0.45198	5530-3519.1	16				
1279.65	0.45199	3519.1-2239.45	17				
8114.35	0.45197	2239.45-1425.1	18				
518.20	0.90395	1425.1-906.898	19	14			
539.64	0.90396	906.898-367.262	20				
218.53	0.67797	367.262-148.728	21	15			
73.23	0.67797	148.728-75.501	22	16			
27.45	0.45187	75.501-48.052	23				
20.35	0.55085	48.052-27.700	24				
11.73	0.55085	27.700-15.968	25	17			
6.09	0.48038	15.968-9.877	26				
5.88	0.90391	9.877-4.000	27	18			
eV		熱中子能群 eV					
0.70	0.19237	4.000-3.300	28	19			
0.70	0.23841	3.300-2.600	29	20			
0.50	0.21357	2.600-2.0	30				
0.60	0.33647	2.100-1.500	31	21			
0.20	0.14310	1.500-1.300	32				
0.15	0.12260	1.300-1.150	33				
0.027	0.02376	1.150-1.123	34				

表5.4-1 WIMS 能群區間 (續)

Energy width	Lethargy Width	能區	群間	能群			
				69 群	26 群	7 群	2 群
0.026	0.02342	1.123-1.097	35	22	4	1	
0.026	0.02399	1.097-1.071	36				
0.026	0.02458	1.071-1.045	37				
0.025	0.02421	1.045-1.020	38				
0.024	0.02381	1.020-0.996	39				
0.024	0.02439	0.996-0.972	40				
0.022	0.02289	0.972-0.950	41				
0.040	0.04302	0.950-0.910	42				
0.060	0.06821	0.910-0.850	43				
0.070	0.08594	0.850-0.780	44				
0.155	0.22154	0.780-0.625	45				
0.125	0.22314	0.625-0.500	46				23
0.100	0.22314	0.500-0.400	47				24
0.050	0.13353	0.400-0.350	48				
0.030	0.08961	0.350-0.320	49				
0.020	0.06454	0.320-0.300	50				
0.020	0.06899	0.300-0.280	51				
0.030	0.11333	0.280-0.250	52				
0.030	0.12783	0.250-0.220	53				
0.040	0.20067	0.220-0.180	54				
0.040	0.25131	0.180-0.140	55				
0.040	0.33647	0.140-0.100	56	25	6		
0.020	0.22314	0.100-0.080	57				
0.013	0.17733	0.080-0.067	58				
0.009	0.14425	0.067-0.058	59				
0.008	0.14842	0.058-0.050	60				
0.008	0.17435	0.050-0.042	61	26	7		
0.007	0.18232	0.042-0.035	62				
0.005	0.15415	0.035-0.030	63				
0.005	0.18232	0.030-0.025	64				
0.005	0.22314	0.025-0.020	65				
0.005	0.28768	0.020-0.015	66				
0.005	0.40547	0.015-0.010	67				
0.005	0.69315	0.010-0.005	68				
0.005		0.005-0.000	69				

表 5.4-2 TRIGA-LEU 8.5/20 燃料中易裂材及可孕材的產生、消耗與

燃耗間之關係

<sup>235</sup> U Burnup, %	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
<sup>235</sup> U Burned, g	0	2.25	4.5	6.75	9	11.25	13.5	15.75	18	20.25	22.5
<sup>234</sup> U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<sup>235</sup> U	45	42.75	40.5	38.25	36	33.75	31.5	29.25	27	24.75	22.5
<sup>236</sup> U	0	0.37	0.74	1.11	1.46	1.82	2.16	2.50	2.83	3.15	3.54
<sup>238</sup> U	180	179.79	179.58	179.37	179.15	178.92	178.68	178.45	178.19	177.93	177.61
U	225	222.91	220.82	218.73	216.61	214.49	212.34	210.20	208.02	205.83	203.65
<sup>237</sup> Np	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.07
Np	0	0	0	0	0	0.02	0.02	0.02	0.04	0.04	0.07
<sup>238</sup> Pu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<sup>239</sup> Pu	0	0.19	0.36	0.52	0.66	0.78	0.88	0.97	1.05	1.12	1.17
<sup>240</sup> Pu	0	0	0.01	0.03	0.05	0.08	0.10	0.14	0.18	0.21	0.26
<sup>241</sup> Pu	0	0	0	0	0	0	0.01	0.03	0.04	0.05	0.07
<sup>242</sup> Pu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pu	0	0.19	0.37	0.55	0.71	0.86	0.99	1.13	1.27	1.39	1.51
<sup>241</sup> Am	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Am	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表 5.4-3 TRIGA-LEU 20/20 燃料中易裂材及可孕材的產生、消耗與

燃耗間之關係

<sup>235</sup> U Burnup, %	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
<sup>235</sup> U Burned, g	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
<sup>234</sup> U	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<sup>235</sup> U	120	114	108	102	96	90	84	78	72	66	60
<sup>236</sup> U	0	1.09	2.14	3.22	4.28	5.27	6.27	7.23	8.16	9.06	9.93
<sup>238</sup> U	480	479.23	478.42	477.55	476.67	475.82	474.92	473.99	473.01	472.02	470.98
U	600	594.32	588.56	582.77	576.95	571.09	565.19	559.22	553.17	547.08	540.91
<sup>237</sup> Np	0	0	0	0	0.06	0.12	0.12	0.18	0.24	0.30	0.36
Np	0	0	0	0	0.06	0.12	0.12	0.18	0.24	0.30	0.36
<sup>238</sup> Pu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<sup>239</sup> Pu	0	0.90	1.33	1.91	2.40	2.82	3.18	3.48	3.73	3.92	4.07
<sup>240</sup> Pu	0	0	0.06	0.13	0.22	0.30	0.40	0.51	0.61	0.72	0.83
<sup>241</sup> Pu	0	0	0	0.02	0.05	0.08	0.13	0.18	0.25	0.32	0.40
<sup>242</sup> Pu	0	0	0	0	0	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.06
Pu	0	0.90	1.39	2.06	2.67	3.20	3.72	4.19	4.62	5.00	5.36
<sup>241</sup> Am	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.06
Am	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06	0.06

表 5.4-4 不同活度分佈下 TRIGA-LEU 8.5/20 燃料棒之空間自我衰

減因子

Item	Source Distribution <sup>a</sup>	Energy (keV)					
		657.9	667.7	743.4	772.6	815.8	1596.5
1	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5510 <sup>b</sup>	0.5540	0.5784	0.5883	0.6033	0.6965
	(1.00,1.25)	1.60 <sup>c</sup>	1.58	1.42	1.36	1.27	0.82
2	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5576	0.5606	0.5845	0.5942	0.6090	0.7007
	(1.00,1.50)	0.42	0.42	0.38	0.36	0.34	0.22
3	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5600	0.5629	0.5868	0.5964	0.6111	0.7022
	(1.00,1.60)	0	0	0	0	0	0
4	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5683	0.5712	0.5945	0.6039	0.6183	0.7076
	(1.00,2.00)	1.49	1.47	1.32	1.26	1.18	0.76
5	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5727	0.5756	0.5986	0.6079	0.6221	0.7104
	(1.00,2.25)	2.27	2.25	2.02	1.93	1.81	1.16
6	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5767	0.5795	0.6023	0.6114	0.6255	0.7129
	(1.00,2.50)	2.97	2.94	2.64	2.53	2.37	1.52

<sup>a</sup>  $S=S_0 \left( C_2-(C_2-C_1) \cos \frac{\pi r}{2a} \right)$

<sup>b</sup> *f*-factor

<sup>c</sup> deviation from item 3



表 5.4-5 不同活度分佈下 TRIGA-LEU 20/20 燃料棒之空間自我衰減

因子

Item	Source Distribution <sup>a</sup>	Energy (keV)					
		657.9	667.7	743.4	772.6	815.8	1596.5
1	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.4983 <sup>b</sup>	0.5024	0.5375	0.5474	0.5635	0.6695
	(1.00,1.25)	3.38 <sup>c</sup>	3.32	2.87	2.75	2.57	1.59
2	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5058	0.5098	0.5443	0.5540	0.5698	0.6741
	(1.00,1.50)	1.93	1.90	1.64	1.57	1.47	0.91
3	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5157	0.5197	0.5534	0.5629	0.5783	0.6803
	(1.00,1.90)	0	0	0	0	0	0
4	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5179	0.5218	0.5554	0.5648	0.5802	0.6817
	(1.00,2.00)	0.42	0.42	0.36	0.34	0.32	0.20
5	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5229	0.5268	0.5600	0.5693	0.5845	0.6848
	(1.00,2.25)	1.39	1.37	1.18	1.14	1.06	0.66
6	(C <sub>1</sub> ,C <sub>2</sub> ) =	0.5274	0.5312	0.5640	0.5732	0.5883	0.6875
	(1.00,2.50)	2.26	2.22	1.92	1.84	1.72	1.06

<sup>a</sup>  $S=S_0 \left( C_2-(C_2-C_1) \cos \frac{\pi r}{2a} \right)$

<sup>b</sup> *f*-factor

<sup>c</sup> deviation from item 3

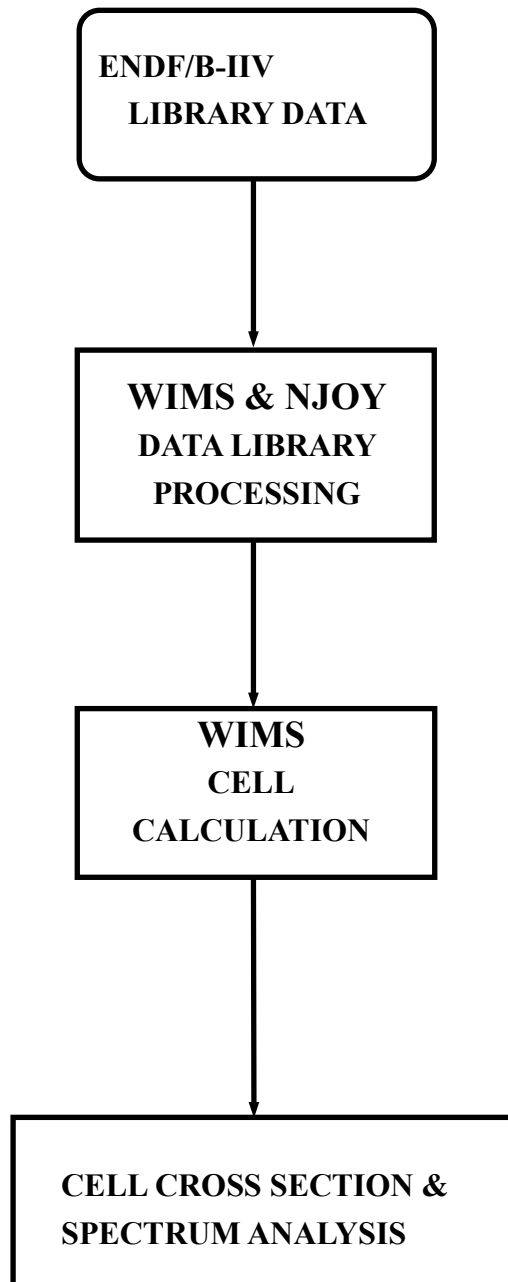


圖 5.4-1 燃料晶格計算流程

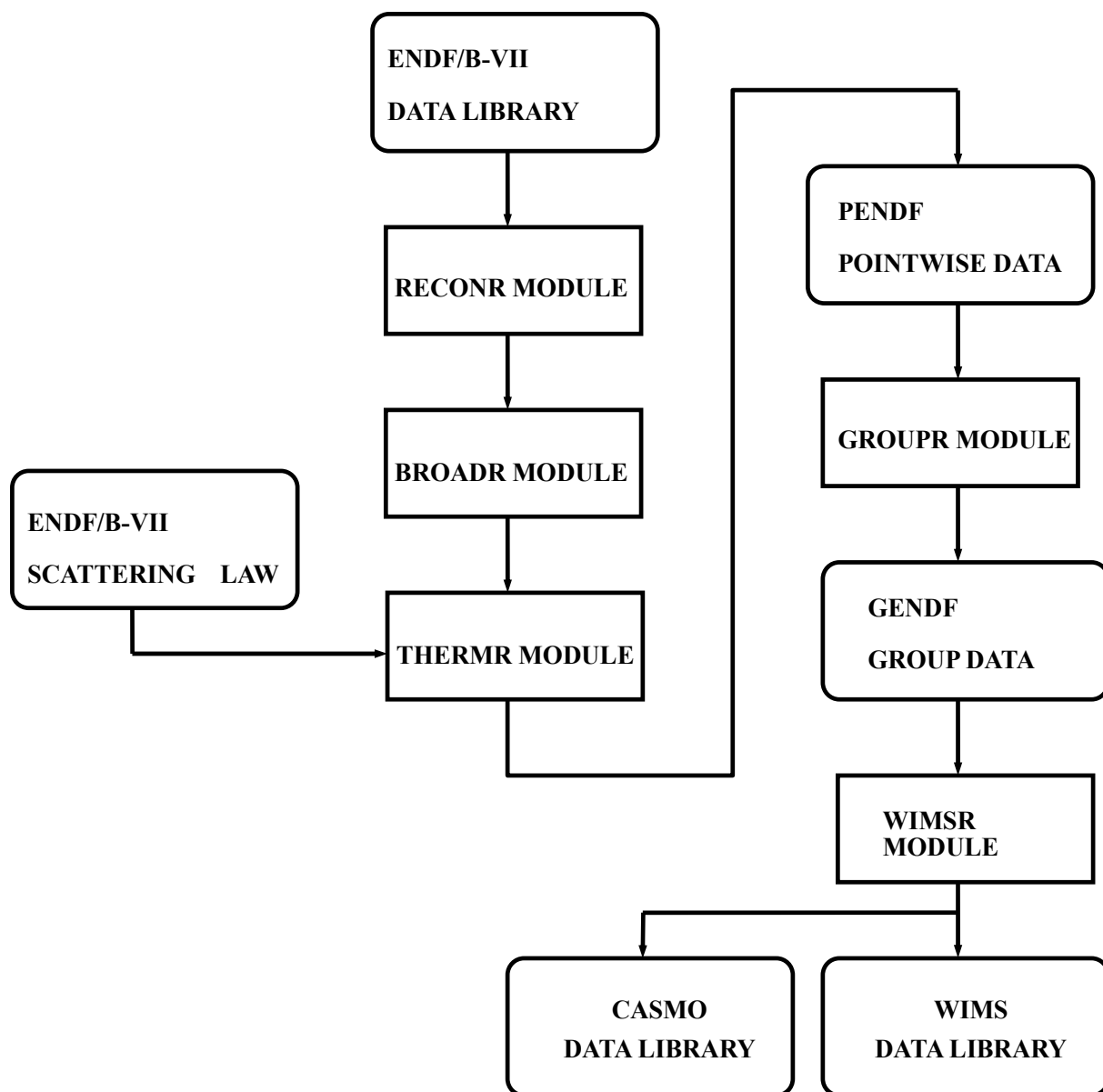


圖 5.4-2 NJOY 計算流程

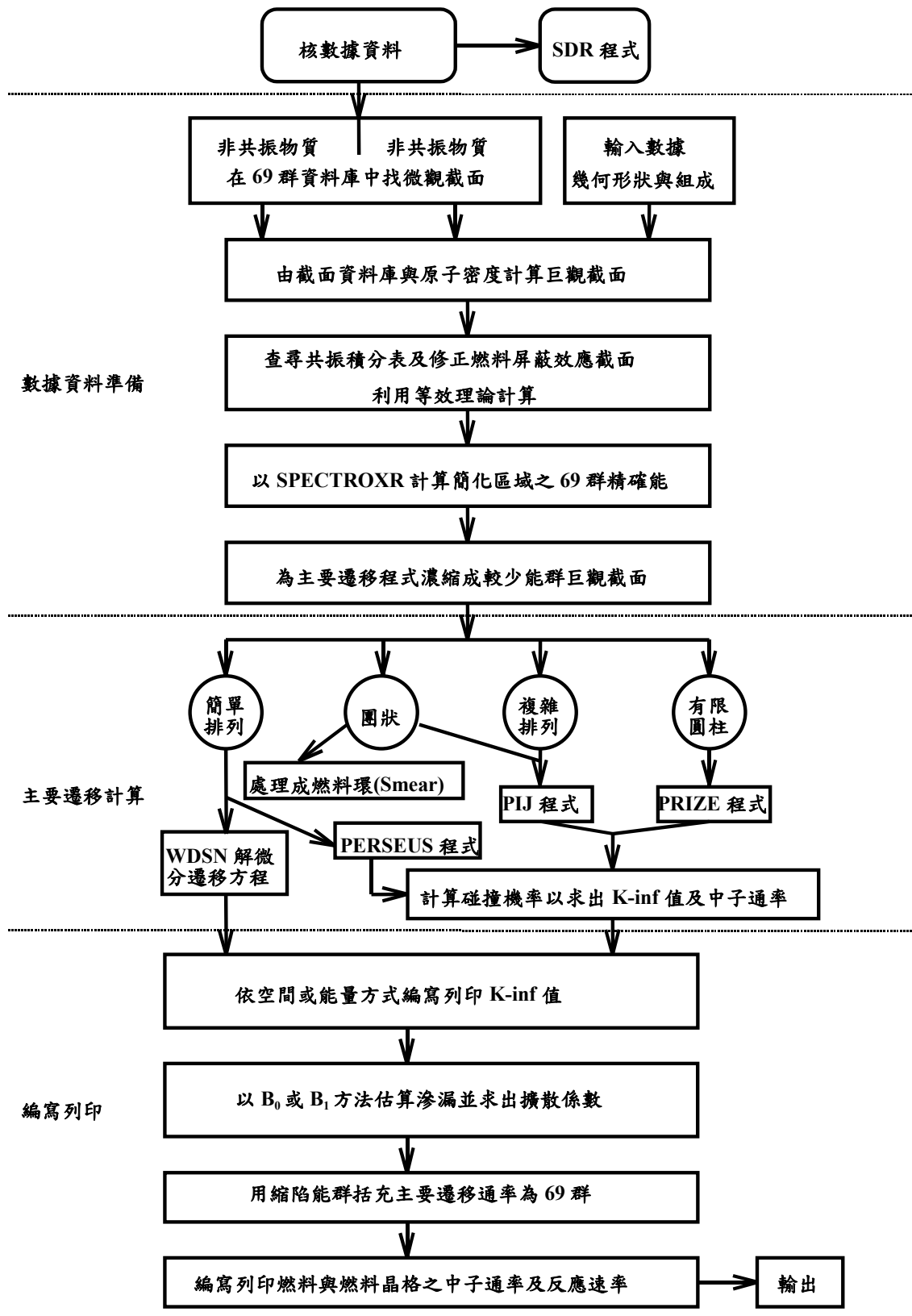
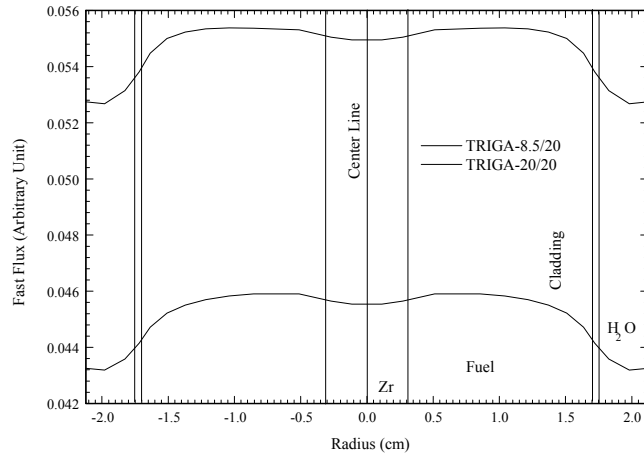
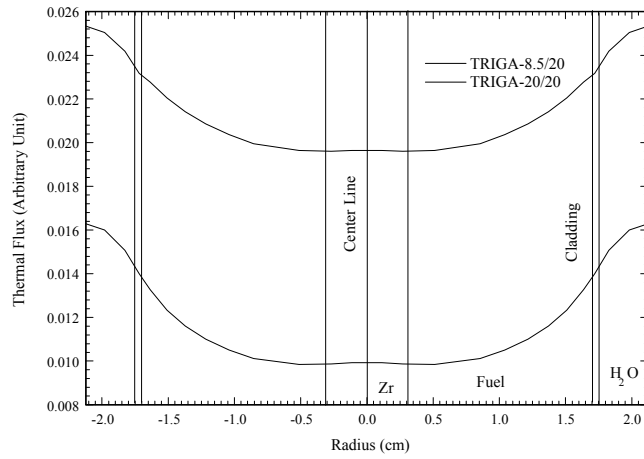


圖 5.4-3 WIMS 計算流程

Neutron Flux Distributions in TRIGA Fuel Unit Cell (by WIMSD)



Neutron Flux Distributions in TRIGA Fuel Unit Cell (by WIMSD)



Neutron Flux Distributions in TRIGA Fuel Unit Cell (by WIMSD)

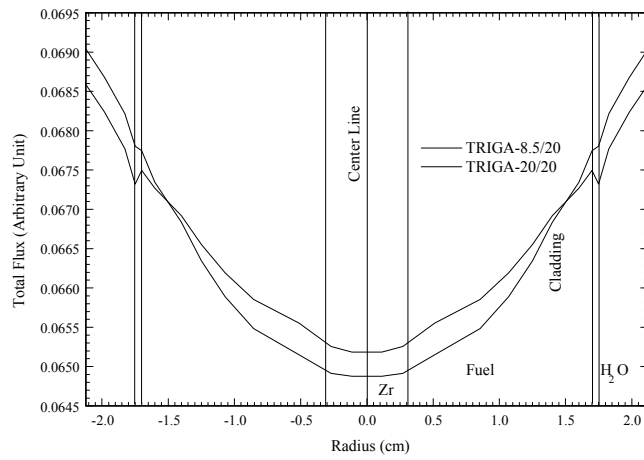


圖 5.4-4 TRIGA 燃料中子通率之分佈

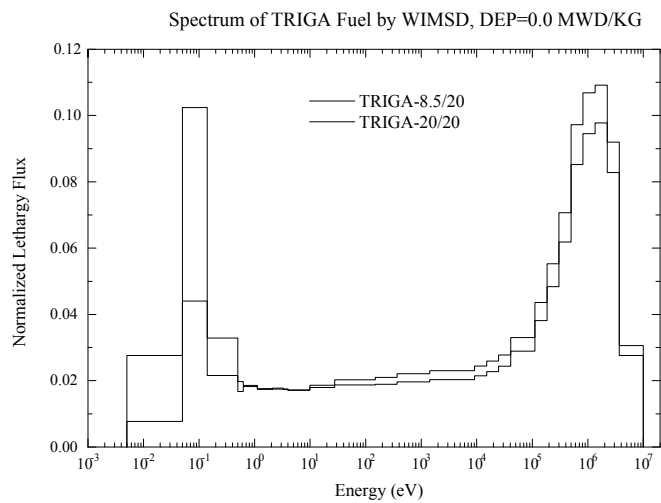
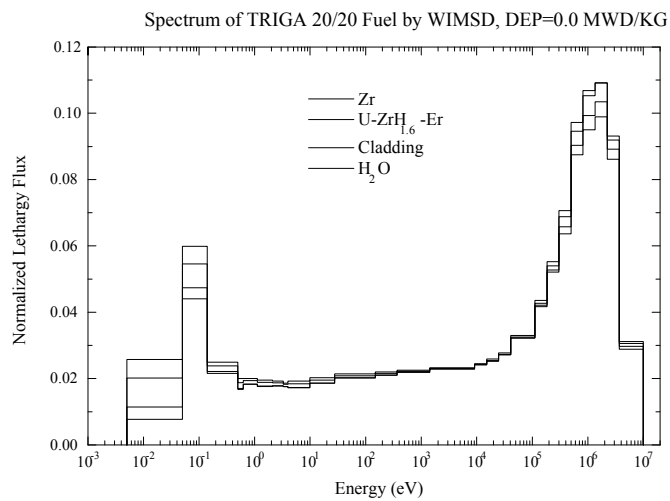
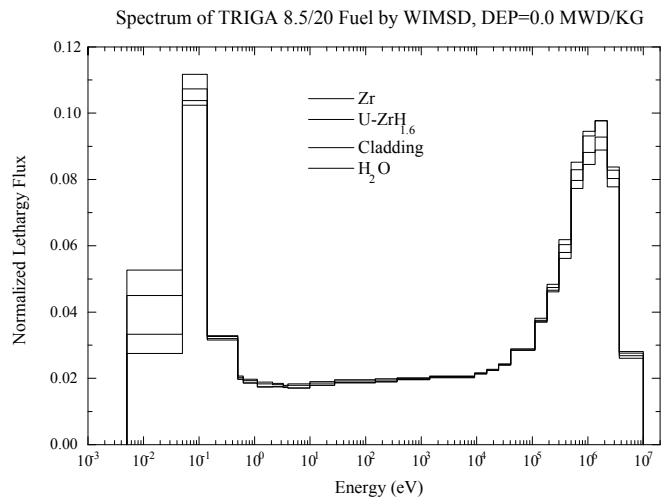


圖 5.4-5 TRIGA 燃料晶格常態化中子通率對能量分佈

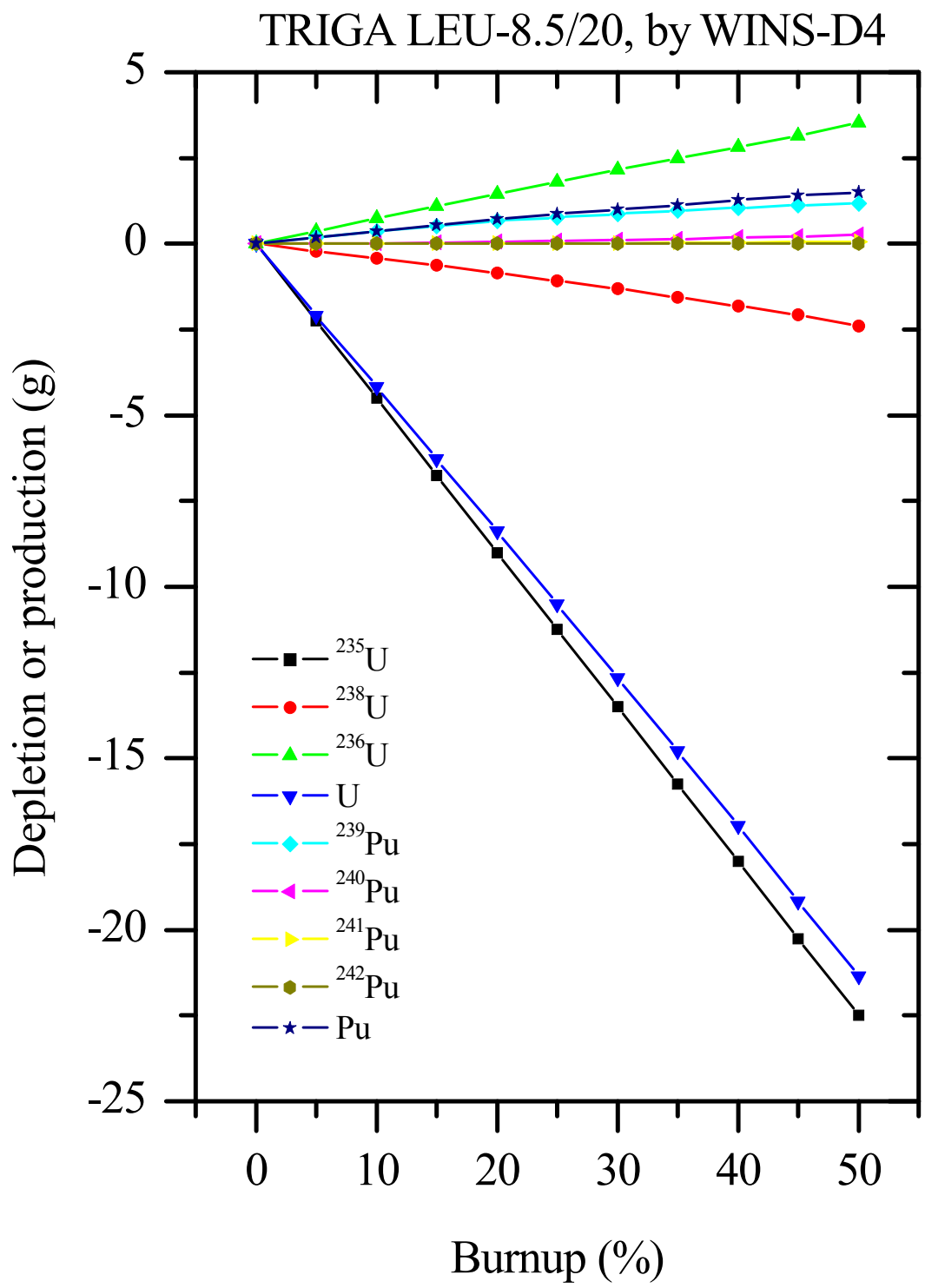


圖 5.4-6 TRIGA-LEU 8.5/20 燃料中易裂材及可孕材的產生、消耗與燃耗之關係

TRIGA LEU-20/20, by WINS-D4

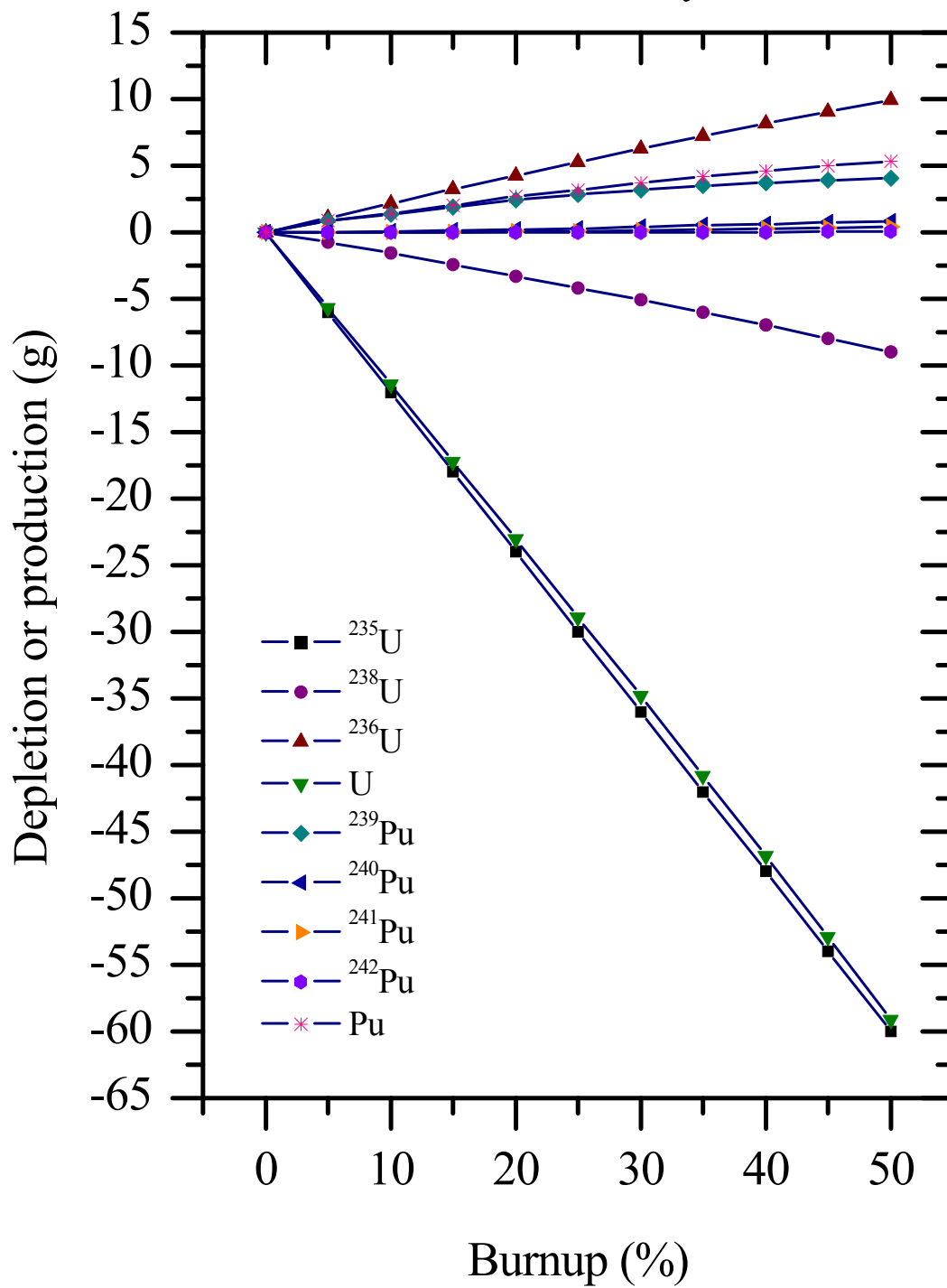


圖 5.4-7 TRIGA-LEU 20/20 燃料中易裂材及可孕材的產生、消耗與燃耗之關係



TRIGA LEU-8.5/20, by WINS-D4

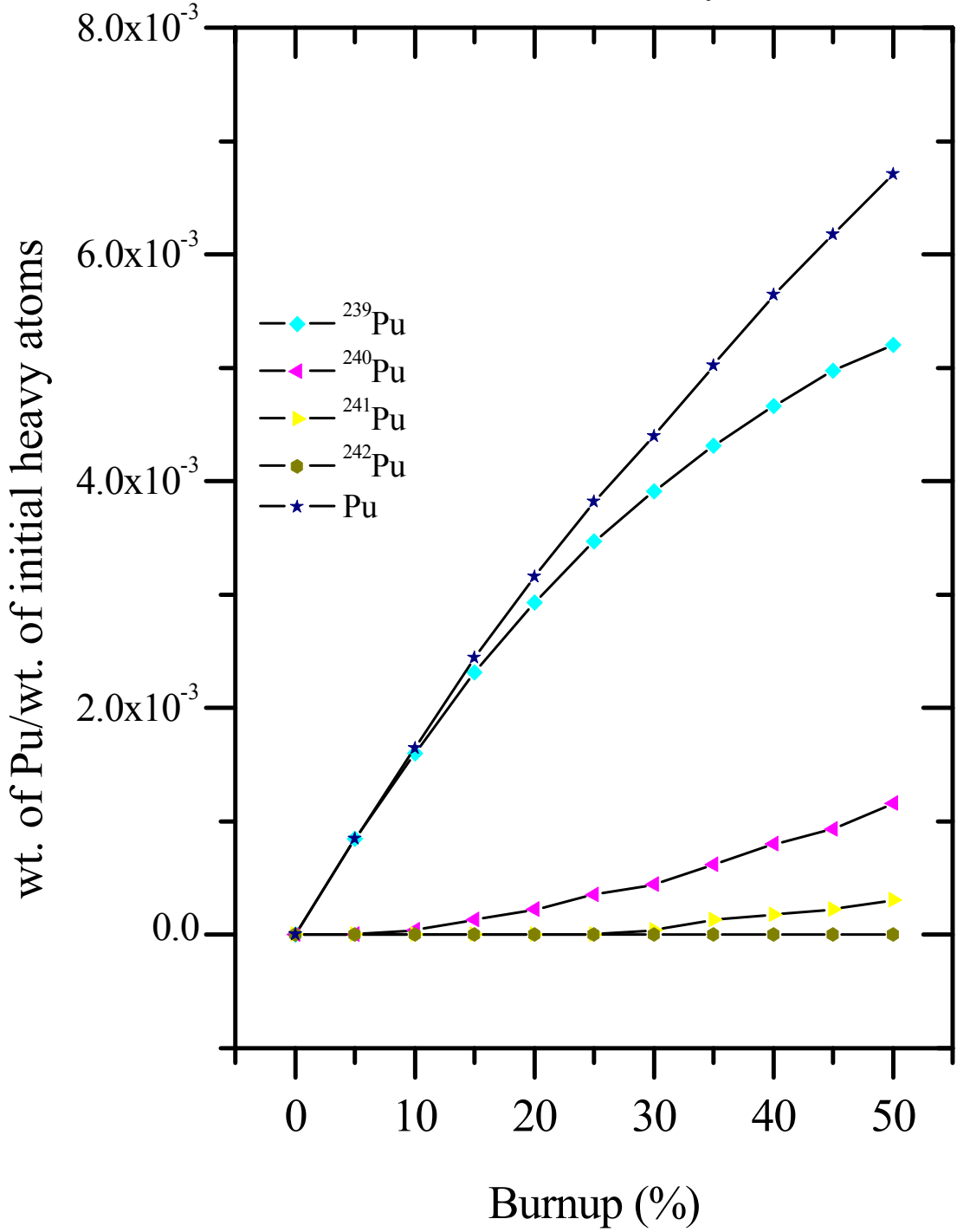


圖 5.4-8 TRIGA-LEU 8.5/20 燃料中 Pu 之產生與燃耗之關係

TRIGA LEU-20/20, by WINS-D4

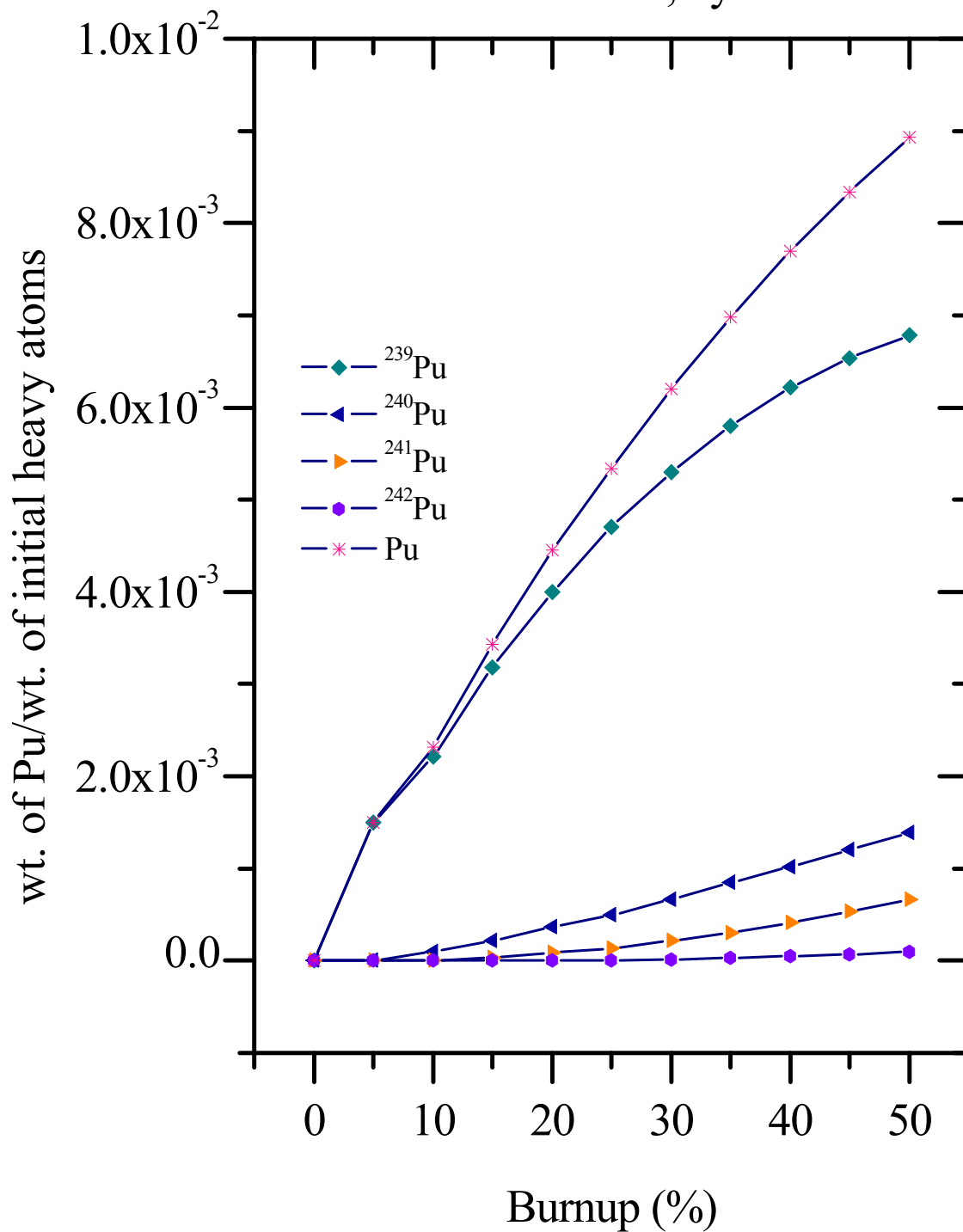


圖 5.4-9 TRIGA-LEU 20/20 燃料中 Pu 之產生與燃耗之關係

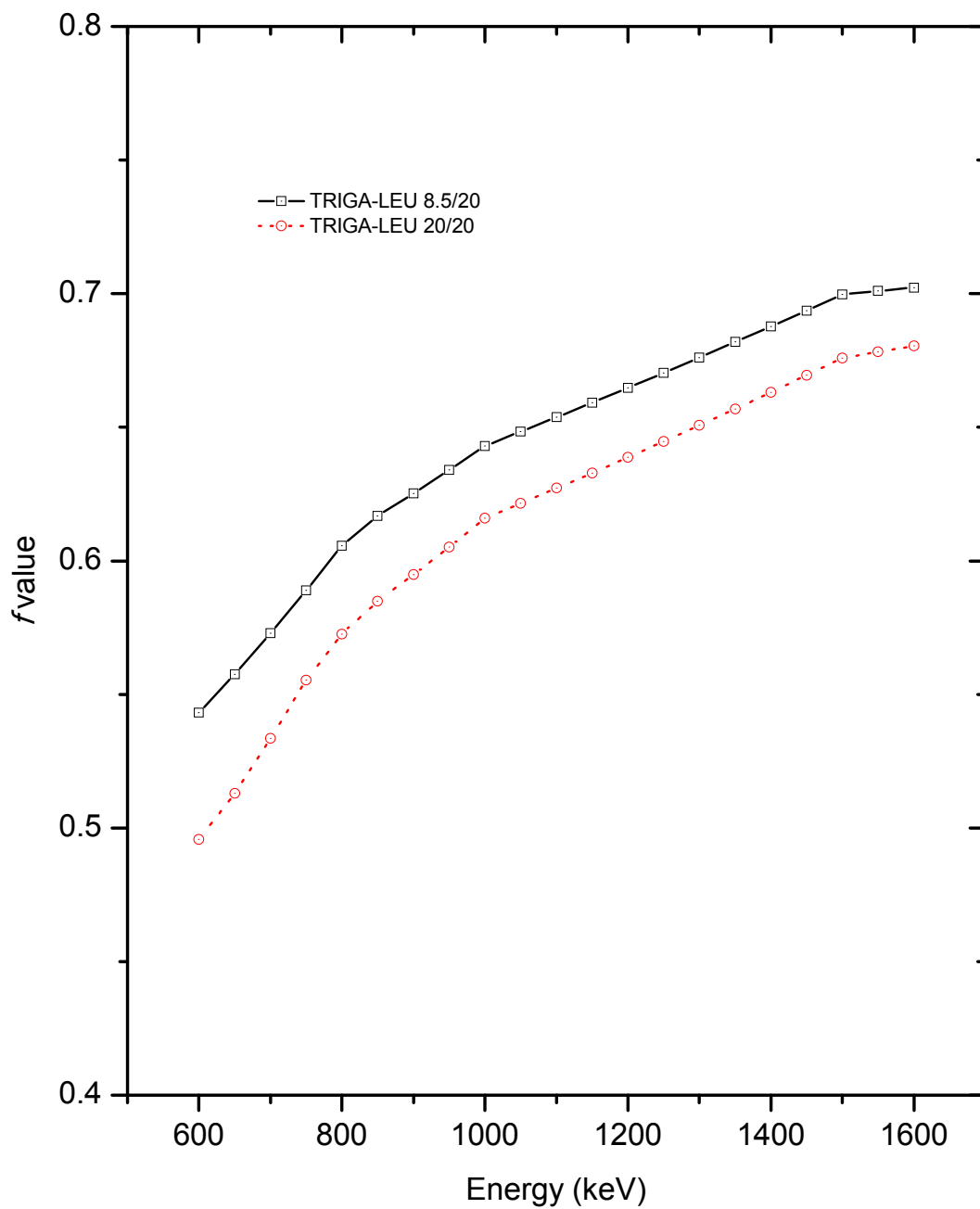


圖 5.4-10 TRIGA-LEU 燃料自我衰減因子

## 陸、主要發現與結論

本研究工作的主要進行之範圍為：以特定的分裂產物為指標所推測出的燃耗值結果，彼此之間可以作為相互驗證與分析之參考；並利用 WIMS 計算程式進行燃耗晶格計算，利用 MCNP 或 SCALE 進行標準尺度計算，同時對核心燃料作燃耗量測之分析與比對。特定的分裂產物主要有 2 大類：

一、短半衰期分裂產物活度推導燃耗值

二、長半衰期分裂產物活度推導燃耗值，作為短半衰期方法的驗證

### 6.1. 短半衰期分裂產物活度推導燃耗值

本文選擇以短半衰期分裂產物 $^{97}\text{Zr}/^{97}\text{Nb}$ 、 $^{132}\text{I}$ 、及 $^{140}\text{La}$ 的活度作為燃耗值指標，來分析並推導 TRIGA 核燃料之燃耗值。由於短半衰期分裂產物活度強度與用過燃料中之 $^{235}\text{U}$ 原子數密度、再照射期間的中子通率和相對分裂產率有關，因此由已知的再照射時間、分裂產率和分裂截面，以 $K_0$ -中子活化分析法，得到之燃料中子通率，以及量測的分裂產物活度，可建立起疊代計算法來反覆推算，而得到用過燃料中 $^{235}\text{U}$ 所剩餘的原子數密度，並可由式(5.1-1)轉換成燃料之燃耗值。以下詳細敘述以疊代計算法，分別由 $^{97}\text{Zr}/^{97}\text{Nb}$ 、 $^{132}\text{I}$ 、及 $^{140}\text{La}$ 推導燃耗值的步驟與結果。

### 6.1.1 由 $^{97}\text{Zr}/^{97}\text{Nb}$ 活度推導燃耗值

用過燃料中所產生  $^{97}\text{Zr}$  的來源有 (a) 直接之分裂產物；(b)  $^{96}\text{Zr}$  經 (n,  $\gamma$ ) 反應等方式 (參閱表5.3-2)，由此可得  $^{97}\text{Zr}$  隨時間變化的數學式為：

$$\begin{aligned} \frac{dN_a(t)}{dt} = & -\lambda_a N_a(t) - \sigma_a^a \phi N_a(t) + \sigma_b^a \phi N_b(t) \\ & + Y_{a25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}(t) + Y_{a49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}(t) \end{aligned} \quad (6.1-1)$$

經整理得

$$\frac{dN_a(t)}{dt} + \lambda_a^* N_a(t) = \sigma_b^a \phi N_b(t) + Y_{a25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}(t) + Y_{a49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}(t) \quad (6.1-2)$$

經推導可以得到表示  $^{97}\text{Zr}$  之原子數密度的式子：

$$\begin{aligned} N_a(t) = & N_a^0 e^{-\lambda_a^* t} + Y_{a25} \sigma_{25}^f \phi N_{25} \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_a^* t}}{\lambda_a^* - \sigma_{25}^a \phi} + Y_{a49} \sigma_{49}^f \phi N_{49} \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_a^* t}}{\lambda_a^* - \sigma_{49}^a \phi} \\ & + \sigma_b^a \phi N_b^0 \frac{e^{-\sigma_b^a \phi t} - e^{-\lambda_a^* t}}{\lambda_a^* - \sigma_b^a \phi} \end{aligned} \quad (6.1-3)$$

其中

$Y$ ：分裂產率

$\sigma$ ：微觀截面；

$\phi$ ：中子通率

$\lambda$ ：衰變常數

$$\lambda^* = \lambda + \sigma^a \phi$$

$N$ ：原子數密度

$N^0$ ：燃料再照射前起始原子數密度

式中下標  $a$ 、 $b$ 、25、及49分別代表 $^{97}\text{Zr}$ 、 $^{96}\text{Zr}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、及 $^{239}\text{Pu}$ ；  
上標  $f$ 及  $a$  分別代表分裂及吸收。因燃料是在一短時間的照射之下，  
故（6.1-3）式中的  $N_{25}$ 及  $N_{49}$ 可視為一常數。

由於用過燃料自核心退出後，經過一長時間的冷卻（約一年），  
使得在燃料再照射實驗時，先前運轉所堆積於其中的 $^{97}\text{Zr}$ 分裂產物皆  
已衰減殆盡，故在（6.1-3）式中的  $N_a^0$  值可設為0。但 $^{96}\text{Zr}$  為穩定元  
素，其在 U-ZrH<sub>1.6</sub>及 Zr 棒中之起始值  $N_b^0$  可利用表5.2-3中來求得，  
在8.5/20燃料中其值為：U-ZrH<sub>1.6</sub>燃料區  $-9.3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ，Zr 棒區  
 $-4.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ；在20/20燃料中則為：U-ZrH<sub>1.6</sub>燃料區  $-9.0 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ，  
Zr 棒區  $-4.2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 。另外，因 $^{96}\text{Zr}$  中子吸收截面很小，故燃料中之  
 $^{96}\text{Zr}$  在核心時所消耗的量可以忽略不計。

此外， $^{97}\text{Zr}$  的半衰期為16.90小時，若偵測計讀的時間較長時，  
必須考量 $^{97}\text{Zr}$  的實驗活度之衰減因素，以修正 $^{97}\text{Zr}$  含量隨時間衰減的

影響。在進行偵檢計讀時，由於中子通率為零，因此在計讀時(6.1-3)

式中僅須考慮第一項，故 $^{97}\text{Zr}$ 的平均含量計算可表示如下：

$$\overline{N}_a = \frac{\int_0^t N_a(t) dt}{\int_0^t dt} = N_a^0 \frac{(1 - e^{-\lambda_a^* t})}{t \cdot \lambda_a^*} \quad (6.1-4)$$

其中

$\overline{N}$ ：計讀時間內分裂產物平均含量之計算值

$N^0$ ：計讀時分裂產物之起始原子數密度

$t$ ：量測時間

$\lambda$ ：衰變常數

$$\lambda^* = \lambda + \sigma^a \phi$$

分裂產物的計算活度則可由下式得到：

$$A_{cal} = \lambda_a \cdot \overline{N}_a \quad (6.1-5)$$

在決定燃耗值時，因燃料棒回爐心照射的時間已知，中子通率分佈可運用前述之  $K_0$ -中子活化分析法以金線量測得知，未知的參數是  $^{235}\text{U}$  與  $^{239}\text{Pu}$  含量，然而需要知道  $^{235}\text{U}$  與  $^{239}\text{Pu}$  之間存在的關係，

否則將無法運用疊代計算法正確的決定出燃耗值。所幸此二者之間的關係可由 5.4.1 節中 WIMS 晶格計算得到，故可以計算程式建立起疊代計算。在運用數值逼近的方法來計算時，乃先猜測  $^{235}\text{U}$  含量並由表 5.4-2、5.4-3 得到相當的  $^{239}\text{Pu}$  含量代入 (6.1-3)、(6.1-4)、和 (6.1-5) 式中計算，得到  $^{97}\text{Zr}$  之計算活度  $A_{cal}$ ，並與 (6.1-14) 式求出的  $^{97}\text{Zr}$  實驗活度  $A_{exp}$  相比較，再藉由計算機程式進行疊代計算，反覆代入新的  $^{235}\text{U}$  與  $^{239}\text{Pu}$  含量加以計算，直到  $A_{cal}$  與  $A_{exp}$  的差值在千分之一的範圍以內，則該次計算的  $^{235}\text{U}$  含量，即為燃料棒中該測量位置剩餘的  $^{235}\text{U}$  含量，而後將此值代入 (5.1-1) 式中，即可得到該位置的燃料燃耗值。

計算分析的執行皆採用二能群法，在計算中所使用到的中子通率及反應截面等相關參數，前者的數據由實驗量測得到（參考 5.3.2 節），後者則取自 GA 公司的資料庫，表 6.1-1 為 TRIGA 燃料的二能群截面資料。

同樣地，燃料燃耗亦可以由  $^{97}\text{Nb}$  的活度來推導，雖然  $^{97}\text{Nb}$  並非直接分裂產物，但由表 5.3-2 可知其產生的方式為 (a)  $^{96}\text{Nb}$  經  $(n, \gamma)$  反應；(b) 直接分裂產物  $^{97}\text{Zr}$  的衰變子核，由此可得  $^{97}\text{Nb}$  隨時間變化的數學式為：



$$\frac{dN_c(t)}{dt} = -\lambda_c N_c(t) - \sigma_c^a \phi N_c(t) + \sigma_d^a \phi N_d(t) + \lambda_e N_e(t) \quad (6.1-6)$$

經整理得：

$$\frac{dN_c(t)}{dt} + \lambda_c^* N_c(t) = \sigma_d^a \phi N_d(t) + \lambda_e N_e(t) \quad (6.1-7)$$

再推導得到<sup>97</sup>Nb 原子數密度的表示式如下：

$$\begin{aligned} N_c(t) = & \frac{\sigma_d \phi Y_{d25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}}{\lambda_d^* - \sigma_{25}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \sigma_{25}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_d^* t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \lambda_d^*} \right] \\ & + \frac{\sigma_d \phi Y_{d49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}}{\lambda_d^* - \sigma_{49}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \sigma_{49}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_d^* t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \lambda_d^*} \right] \\ & + \sigma_d \phi N_d^0 \frac{e^{-\lambda_d^* t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \lambda_d^*} + \frac{\lambda_e Y_{e25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}}{\lambda_e^* - \sigma_{25}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \sigma_{25}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_e^* t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \lambda_e^*} \right] \\ & + \frac{\lambda_e Y_{e49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}}{\lambda_e^* - \sigma_{49}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \sigma_{49}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_e^* t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \lambda_e^*} \right] + \lambda_e N_e^0 \frac{e^{-\lambda_e^* t} - e^{-\lambda_c^* t}}{\lambda_c^* - \lambda_e^*} \\ & + N_c^0 e^{-\lambda_c^* t} \end{aligned} \quad (6.1-8)$$

式中下標  $c$ 、 $d$ 、 $e$ 、 $25$ 、及 $49$ 分別代表<sup>97</sup>Nb、<sup>96</sup>Nb、<sup>97</sup>Zr、<sup>235</sup>U、及<sup>239</sup>Pu；上標 $f$ 及 $a$ 分別代表分裂及吸收。在同樣的短時間照射之下，(6.1-8) 式中的  $N_{25}$  及  $N_{49}$  亦如同在 (6.1-3) 式中所討論的，可視為一常數。在經過一長時間的冷卻（約一年），燃料於再照射實驗時，先前運轉所堆積於其中的<sup>97</sup>Nb、<sup>96</sup>Nb（23.4小時）及<sup>97</sup>Zr 皆已衰減殆盡，故 (6.1-8) 式中  $N_c^0$ 、 $N_d^0$ 、及  $N_e^0$  可以設為0。

$^{97}\text{Nb}$  的半衰期為1.202小時，若偵測計讀的時間較長時，也必須修正 $^{97}\text{Nb}$  含量隨時間衰減的影響。因在計讀時（6.1-8）式中僅須考慮第一項，故 $^{97}\text{Nb}$  的平均含量計算可表示如下：

$$\begin{aligned} \overline{N_c} &= \frac{\int_0^t N_c(t) dt}{\int_0^t dt} \\ &= N_c^0 \frac{(1 - e^{-\lambda_c^* t})}{t \cdot \lambda_c^*} + \frac{\lambda_e N_e^0}{t(\lambda_c^* - \lambda_e^*)} \left\{ \frac{(1 - e^{-\lambda_e^* t})}{\lambda_e^*} - \frac{(1 - e^{-\lambda_c^* t})}{\lambda_c^*} \right\} \end{aligned} \quad (6.1-9)$$

同樣地，運用先前所敘述以 $^{97}\text{Zr}$  活度推導燃耗值所建立的疊代的方法，利用（6.1-8）、（6.1-9）、及（6.1-5）式，並藉計算程式推算用過燃料中所剩的 $^{235}\text{U}$  含量  $N_{25}$ ，並進一步導出燃料燃耗值。

### 6.1.2 由 $^{132}\text{I}$ 活度推導燃耗值

基於 $^{132}\text{I}$  可以由 (a)  $^{131}\text{I}$  經 (n,  $\gamma$ ) 反應；(b) 直接分裂產物 $^{132}\text{Te}$  的衰變等方式產生，由此可得 $^{132}\text{I}$  隨時間變化的數學式為：

$$\frac{dN_f(t)}{dt} = -\lambda_f N_f(t) - \sigma_f^a \phi N_f(t) + \sigma_g^a \phi N_g(t) + \lambda_h N_h(t) \quad (6.1-10)$$

經整理得：

$$\frac{dN_f(t)}{dt} + \lambda_f^* N_f(t) = \sigma_g^a \phi N_g(t) + \lambda_h N_h(t) \quad (6.1-11)$$

再經推導可得到<sup>132</sup>I 原子數密度的式子如下：

$$\begin{aligned}
 N_f(t) = & \frac{\sigma_g \phi Y_{g25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}}{\lambda_g^* - \sigma_{25}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \sigma_{25}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_g^* t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \lambda_g^*} \right] \\
 & + \frac{\sigma_g \phi Y_{g49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}}{\lambda_g^* - \sigma_{49}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \sigma_{49}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_g^* t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \lambda_g^*} \right] \\
 & + \sigma_g \phi N_g^0 \frac{e^{-\lambda_g^* t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \lambda_g^*} + \frac{\lambda_h Y_{h25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}}{\lambda_h^* - \sigma_{25}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \sigma_{25}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_h^* t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \lambda_h^*} \right] \\
 & + \frac{\lambda_h Y_{h49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}}{\lambda_h^* - \sigma_{49}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \sigma_{49}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_h^* t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \lambda_h^*} \right] + \lambda_h N_h^0 \frac{e^{-\lambda_h^* t} - e^{-\lambda_f^* t}}{\lambda_f^* - \lambda_h^*} \\
 & + N_f^0 e^{-\lambda_f^* t}
 \end{aligned} \tag{6.1-12}$$

式中下標  $f$ 、 $g$ 、 $h$ 、 $25$  及  $49$  分別代表 <sup>132</sup>I、<sup>131</sup>I、<sup>132</sup>Te、<sup>235</sup>U、及 <sup>239</sup>Pu；

上標  $f$  及  $a$  分別代表分裂及吸收。

在同樣的短時間照射之下，如(6.1-3)式與(6.1-8)式，(6.1-12)式中的  $N_{25}$  及  $N_{49}$  亦可視為一常數。在長時間的冷卻（約一年），燃料於再照射實驗時，先前運轉所堆積於其中的 <sup>132</sup>I、<sup>131</sup>I（8.04天）、及 <sup>132</sup>Te（3.26天）皆已衰減殆盡，故  $N_f^0$ 、 $N_g^0$ 、及  $N_h^0$  皆可以設為0。

<sup>132</sup>I 的半衰期為2.30小時，如同<sup>97</sup>Zr 及<sup>97</sup>Nb，在較長的偵測計讀時間，<sup>132</sup>I 含量隨時間衰減的影響亦必須修正。因在計讀時(6.1-12)式中僅須考慮第一項，故<sup>132</sup>I 的平均含量計算可表示如下：

$$\begin{aligned} \overline{N}_f &= \frac{\int_0^t N_f(t) dt}{\int_0^t dt} \\ &= N_f^0 \frac{(1 - e^{-\lambda_f^* t})}{t \cdot \lambda_f^*} + \frac{\lambda_h N_h^0}{t(\lambda_f^* - \lambda_h^*)} \left\{ \frac{(1 - e^{-\lambda_h^* t})}{\lambda_h^*} - \frac{(1 - e^{-\lambda_f^* t})}{\lambda_f^*} \right\} \end{aligned} \quad (6.1-13)$$

同樣地運用在先前以<sup>97</sup>Zr推導燃耗值中所敘述的反覆計算法，並利用(6.1-12)、(6.1-13)、及(6.1-5)式，可推算用過燃料中所剩餘的<sup>235</sup>U含量 $N_{25}$ ，並進一步導出燃料燃耗值，詳細的推導過程不在此重覆敘述。

### 6.1.3 由<sup>140</sup>La活度推導燃耗值

基於用過燃料中產生<sup>140</sup>La之來源有三：(a)直接之分裂產物；(b)分裂產物<sup>139</sup>La經(n, γ)反應；(c)分裂產物<sup>140</sup>Ba之子代核種。由此可得<sup>140</sup>La隨時間變化的數學式為：

$$\begin{aligned} \frac{dN_i(t)}{dt} &= -\lambda_i N_i(t) - \sigma_i^a \phi N_i(t) + \sigma_j^a \phi N_j(t) + \lambda_k N_k(t) \\ &\quad + Y_{i25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}(t) + Y_{i49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}(t) \end{aligned} \quad (6.1-14)$$

經整理得：

$$\begin{aligned} \frac{dN_i(t)}{dt} + \lambda_i^* N_i(t) &= \sigma_j^a \phi N_j(t) + \lambda_k N_k(t) \\ &\quad + Y_{i25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}(t) + Y_{i49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}(t) \end{aligned} \quad (6.1-15)$$

再經推導可以得到下列<sup>140</sup>La原子數密度之公式：

$$\begin{aligned}
N_i(t) = & \frac{\sigma_j \phi Y_{j25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}}{\lambda_j^* - \sigma_{25}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \sigma_{25}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_j^* t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \lambda_j^*} \right] \\
& + \frac{\sigma_j \phi Y_{j49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}}{\lambda_j^* - \sigma_{49}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \sigma_{49}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_j^* t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \lambda_j^*} \right] + \sigma_j \phi N_j^0 \frac{e^{-\lambda_j^* t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \lambda_j^*} \\
& + \frac{\lambda_k Y_{k25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}}{\lambda_k^* - \sigma_{25}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \sigma_{25}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_k^* t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \lambda_k^*} \right] \\
& + \frac{\lambda_k Y_{k49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}}{\lambda_k^* - \sigma_{49}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \sigma_{49}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_k^* t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \lambda_k^*} \right] + \lambda_k N_k^0 \frac{e^{-\lambda_k^* t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \lambda_k^*} \\
& + Y_{i25} \sigma_{25}^f \phi N_{25} \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \sigma_{25}^a \phi} + Y_{i49} \sigma_{49}^f \phi N_{49} \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \sigma_{49}^a \phi} + N_i^0 e^{-\lambda_i^* t}
\end{aligned} \tag{6.1-16}$$

式中下標  $i$ 、 $j$ 、 $k$ 、25、及49分別代表 $^{140}\text{La}$ 、 $^{139}\text{La}$ 、 $^{140}\text{Ba}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、及 $^{239}\text{Pu}$ ；上標  $f$  及  $a$  分別代表分裂及吸收，對一短暫的再照射時間而言，(6.1-16) 式中之  $N_{25}$  及  $N_{49}$  亦可視為一常數。

若燃料自爐心取出後經過較長時間（通常是一年以上）之後方經歷再照射，則(6.1-16)式中之起始值  $N_i^0$  及  $N_k^0$  可設為零，此乃由於 $^{140}\text{La}$ （半衰期40.27小時）及 $^{140}\text{Ba}$ （半衰期12.79天）皆短半衰期之元素。但 $^{139}\text{La}$ 為穩定元素，並不適用此一假設。所幸經計算， $N_j^0$  對  $N_i$  之影響不大（由  $N_j^0$  值代0或 $10^{10}\text{cm}^{-3}$ 的計算顯示），即(6.1-16)式中等號右邊第二項對  $N_i$  的影響不大，由此亦顯示  $N_i^0$ 、 $N_j^0$  及  $N_k^0$  累積的結果大小對 $^{140}\text{La}$  的含量不致造成明顯的影響。

若偵測計讀的時間較長時，亦必須考量 $^{140}\text{La}$  的活度衰減因素，

以修正  $^{140}\text{La}$  含量隨時間衰減的影響。故計讀時  $^{140}\text{La}$  的平均含量為：

$$\overline{N}_i = \frac{\int_0^t N_i(t) dt}{\int_0^t dt} = N_i^0 \frac{(1 - e^{-\lambda_i^* t})}{t \cdot \lambda_i^*} + \frac{\lambda_k N_k^0}{t(\lambda_i^* - \lambda_k^*)} \left[ \frac{(1 - e^{-\lambda_k^* t})}{\lambda_k^*} - \frac{(1 - e^{-\lambda_i^* t})}{\lambda_i^*} \right] \quad (6.1-17)$$

相關之燃料燃耗值計算方法與進行步驟，與6.1.1.1節中所描述由  $^{97}\text{Zr}$  活度推導燃耗值之方法相同，不再於此重述。

#### 6.1.4 燃耗值推導方法之驗證

為確立以上所建立之燃耗量測系統與分析方法的正確性，依照上述方法，先利用全新 TRIGA 燃料元件，進行燃料燃耗的量測，以對新發展出的燃耗分析方法作一驗證。由於是全新燃料，故沒有任何的燃耗（即相當燃耗值為0%），因此各偵測位置之  $^{235}\text{U}$  量測含量與廠商提供之  $^{235}\text{U}$  原有含量間的比值應為1（100%）。

表6.1-1及6.1-2是利用分裂產物  $^{97}\text{Nb}$ ：657.9keV、 $^{97}\text{Zr}$ ：743.4keV； $^{132}\text{I}$ ：667.7keV、772.6keV；及  $^{140}\text{La}$ ：815.8keV、1596.5keV 能峰，所分別推導出 TRIGA-LEU 8.5/20燃料元件 F-2-55（燃料棒號碼：10157、10158、10159、10160）與 TRIGA-LEU 20/20燃料元件 F-2-66（燃料棒號碼：10106、10107、10121、10121）中  $^{235}\text{U}$  之含量與廠商所提供含量的比值。由結果顯示其彼此間的偏差程度皆在5%範圍內（介

於0.95~1.05之間)，但若考慮其平均值，即表6.1-2及6.1-3最右欄中 Ave.項的值，偏差的程度僅在3%。造成以上量測誤差的原因，將於後面章節中討論。圖6.1-1、6.1-2為根據表6.1-2、6.1-3並針對各燃料棒所畫出之結果。

由以上驗證的結果良好，顯示所設置的燃料燃耗偵測系統與發展的分析方法已確實建立完成，可將其應用於用過燃料之燃耗偵測與評估。但需要注意的是，由於全新燃料中並無<sup>239</sup>Pu 元素，故在應用上，以上述方法推導全新燃料燃耗值的過程較推導用過燃料的為簡單，可以在不知道<sup>235</sup>U 與<sup>239</sup>Pu 之間關係的情況下來決定燃耗值，即可省略晶格計算中求得燃耗關係的部分。

### 6.1.5 結果

在燃耗分析推導方法之驗證後，運用以上建立的短半衰期分裂產物的方法，對四組 TRIGA 用過燃料元件分別進行燃耗量測實驗，這四組用過燃料分別是：兩組 TRIGA-LEU 8.5/20燃料元件 F-2-21(燃料棒號碼：10126、10127、10128、10129) 與 F-2-30 (燃料棒號碼：8514、8516、8517、8518)；兩組 TRIGA-LEU 20/20燃料元件 F-2-14 (燃料棒號碼：10062、10064、10065、10066) 與 F-2-02 (燃料棒號碼：9501、9502、9503、9504)。表6.1-4是 THOR 的運轉歷史，

表6.1-5、6.1-6則為待測燃料元件的簡單照射歷史。

經實驗及分析後所得到的燃料元件燃耗值分別列於表6.1-7~6.1-10的 A、B、C、D、E 項，AVE-1為這五項總和的平均，16根 TRIGA 燃料棒的燃耗推導結果則表示於圖6.1-3~6.1-6中。以 AVE-1為參考值，將 $(A+B)/2(^{97}\text{Zr}/^{97}\text{Nb})$ 、 $(C+D)/2(^{132}\text{I})$ 、及  $E(^{140}\text{La})$  項與其相比較，得知誤差分別在4%、5%、及4%的範圍內。



表6.1-1 TRIGA 燃料二能群截面資料

Fuel Type	Nuclide	Temp(°C)	$\sigma_{f1}(b)$	$\sigma_{f2}(b)$	$\sigma_{a1}(b)$	$\sigma_{a2}(b)$
TRIGA- LEU 8.5/20	$^{235}\text{U}$	23	69.0241	457.0593	80.7781	535.5284
		200	69.6464	435.1347	81.4966	509.9063
	$^{238}\text{U}$	23	$2.974 \times 10^{-8}$	0	0.5863	2.1547
		200	$2.975 \times 10^{-8}$	0	0.5907	2.0565
	$^{239}\text{Pu}$	23	-	-	-	-
		200	113.5424	635.6549	172.2743	910.7669
TRIGA- LEU 20/20	$^{235}\text{U}$	23	68.0300	374.5984	79.6660	438.9965
		310	68.6487	349.0020	80.3691	409.0711
	$^{238}\text{U}$	23	$2.945 \times 10^{-8}$	0	0.5738	1.7784
		310	$2.945 \times 10^{-8}$	0	0.5778	1.6615
	$^{239}\text{Pu}$	23	-	-	-	-
		310	114.5320	530.7595	174.3484	767.2586

表6.1-2 全新燃料元件 F-2-54中235U 量測含量與廠商提供含量的比值

Position NO.	Enrichment Ratio ( TRIGA-LEU 8.5/20 )						Ave. <sup>g</sup>
	A <sup>a</sup>	B <sup>b</sup>	C <sup>c</sup>	D <sup>d</sup>	E <sup>e</sup>	F <sup>f</sup>	
Rod NO. 10157							
1	0.99	1.01	1.02	1.03	0.99	0.98	1.00
2	1.04	1.02	1.01	1.00	1.03	1.04	1.02
3	1.05	0.97	0.97	1.02	1.00	1.02	1.01
4	1.02	1.02	1.03	1.01	1.03	1.02	1.02
5	0.98	0.99	1.01	1.03	1.04	1.05	1.02
6	1.04	1.02	1.03	1.02	1.04	1.03	1.03
7	1.00	0.99	0.96	0.98	1.00	0.97	0.98
8	0.99	1.02	1.03	0.99	0.97	1.04	1.01
Rod NO. 10158							
1	0.98	0.95	0.97	0.99	0.96	0.98	0.97
2	1.02	0.99	0.99	0.95	0.98	1.01	0.99
3	0.97	1.02	0.96	1.03	0.97	0.97	0.99
4	0.99	1.01	0.97	1.00	0.98	0.98	0.99
5	1.02	0.96	0.99	0.99	0.97	1.02	1.00
6	1.01	0.95	0.98	1.00	1.00	0.98	0.99
7	1.01	0.96	1.02	1.03	0.97	0.99	1.00
8	1.03	1.01	1.02	1.03	1.02	1.01	1.02
Rod NO. 10159							
1	1.04	1.00	1.03	1.04	1.00	1.04	1.03
2	0.99	1.02	1.04	1.03	1.05	1.04	1.03
3	1.03	1.02	1.02	0.98	1.02	1.00	1.01
4	0.98	0.99	1.02	1.00	0.98	1.00	1.00
5	1.05	1.00	1.02	1.02	1.00	0.98	1.01
6	0.97	1.03	0.97	1.00	0.97	0.99	0.99
7	1.04	0.99	0.99	0.98	0.97	0.96	0.99
8	1.04	1.01	0.98	1.04	1.03	0.98	1.01
Rod NO. 10160							
1	0.97	1.00	1.02	1.00	0.97	1.01	1.00
2	0.96	1.00	0.99	0.97	0.99	0.97	0.98
3	1.03	0.99	0.96	1.00	1.00	0.99	1.00
4	0.98	0.98	0.97	0.95	0.99	0.97	0.97
5	1.03	0.99	0.98	0.99	1.02	1.00	1.00
6	0.96	1.00	1.01	1.02	1.02	1.01	1.00
7	1.03	1.03	0.97	1.02	1.02	1.02	1.02
8	1.01	1.03	1.02	1.02	1.01	1.01	1.02

<sup>a</sup> Deduced from <sup>97</sup>Nb-657.9keV

<sup>b</sup> Deduced from <sup>97</sup>Zr-743.4keV

<sup>c</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-667.7keV

<sup>d</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-772.6keV

<sup>e</sup> Deduced from <sup>140</sup>La-815.8keV

<sup>f</sup> Deduced from <sup>140</sup>La-1596.5keV

<sup>g</sup> Ave.= ( A+B+C+D+E+F ) /6

表6.1-3 全新燃料元件 F-2-66 中<sup>235</sup>U 量測含量與廠商提供含量的比值

Position NO.	Enrichment Ratio ( TRIGA-LEU 20/20 )						Ave. <sup>g</sup>
	A <sup>a</sup>	B <sup>b</sup>	C <sup>c</sup>	D <sup>d</sup>	E <sup>e</sup>	F <sup>f</sup>	
Rod NO. 10106							
1	0.97	0.98	0.97	1.01	0.98	0.99	0.98
2	1.00	1.03	1.02	0.98	1.01	1.03	1.01
3	0.99	1.03	1.00	0.98	1.03	1.04	1.01
4	0.99	0.98	1.00	1.03	1.03	0.98	1.00
5	1.02	1.03	1.03	0.97	1.02	0.99	1.01
6	1.01	1.02	0.98	0.98	1.03	1.04	1.01
7	0.98	1.01	0.96	0.97	0.97	1.01	0.98
8	0.96	1.03	0.99	1.00	1.03	1.03	1.01
Rod NO. 10107							
1	1.03	0.96	0.98	1.00	0.99	0.98	0.99
2	0.97	1.00	1.01	1.00	0.97	1.00	0.99
3	0.97	0.99	0.97	0.98	0.99	1.03	0.99
4	0.99	0.99	0.98	1.03	0.98	0.96	0.99
5	1.05	0.99	0.97	0.98	0.99	1.04	1.00
6	0.99	1.02	1.00	1.03	1.02	1.04	1.02
7	0.97	1.01	0.99	0.98	0.98	1.02	0.99
8	0.96	1.01	0.99	0.98	1.01	1.03	1.00
Rod NO. 10120							
1	1.00	1.02	0.98	1.02	0.98	0.98	1.00
2	0.96	0.98	1.00	1.00	0.99	1.02	0.99
3	0.97	0.98	0.99	1.00	1.01	1.04	1.00
4	0.96	0.97	0.97	0.99	0.97	1.03	0.98
5	1.02	1.00	1.03	0.97	1.02	0.98	1.00
6	0.99	1.01	0.96	1.02	0.98	0.99	0.99
7	0.98	1.00	1.01	1.01	0.98	1.04	1.00
8	1.00	1.02	1.01	0.96	1.01	0.96	0.99
Rod NO. 10121							
1	0.97	0.98	0.98	1.03	1.03	1.02	1.00
2	1.02	1.01	0.99	1.00	0.98	1.02	1.00
3	0.96	0.98	1.00	0.96	0.98	0.97	0.98
4	0.97	0.98	0.96	1.02	0.97	0.97	0.98
5	0.96	1.04	1.00	0.99	0.96	0.98	0.99
6	0.98	0.98	0.98	0.99	0.98	1.02	0.99
7	0.97	0.99	1.03	0.97	1.02	1.04	1.00
8	1.03	1.02	1.04	0.95	1.02	1.02	1.01

<sup>a</sup> Deduced from <sup>97</sup>Nb-657.9keV

<sup>b</sup> Deduced from <sup>97</sup>Zr-743.4keV

<sup>c</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-667.7keV

<sup>d</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-772.6keV

<sup>e</sup> Deduced from <sup>140</sup>La-815.8keV

<sup>f</sup> Deduced from <sup>140</sup>La-1596.5keV

<sup>g</sup> Ave. = ( A+B+C+D+E+F ) /6

表6.1-4 THOR 燃料運轉歷史 (1977.09.15-1996.11.28)

期 間	運轉時數 (hr)	累積運轉能量 (MWH)
1977.09.15~1986.06.05	13104.17	9362.19
1986.06.05~1987.08.21	1736.31	1413.69
1987.08.21~1993.07.20	7753.15	7706.96
1993.07.20~1996.10.18	3656.36	3559.62
1996.10.18~1996.11.28	162.27	162.27

\*1987.08.21 前為 MTR+TRIGA 混合爐心；1987.08.21 後為 TRIGA 爐心。

表6.1-5 THOR 燃耗量測燃料元件運轉歷史

燃料元 件批號	燃 料 型 式	在 爐 心 期 間	在爐心運轉時 數 (hr)	累積運轉能量 (MWD)
F2-21	TRIGA-LEU 8.5/20	1993.07.20~1996.10.18	3656.36	148.32
F2-30	TRIGA-LEU 8.5/20	1977.09.15~1996.11.28	26412.26	925.20
F2-14	TRIGA-LEU 20/20	1987.08.21~1996.10.18	11409.51	469.44
F2-02	TRIGA-LEU 20/20	1986.06.05~1996.11.28	13308.09	535.11

表6.1-6 THOR 燃耗量測燃料元件照射歷史

Fuel cluster assembly	Action	Date	Position
F-2-21	Load	1993.07.20	C4
	Discharge	1996.10.18	C4
F-2-30	Load	1977.09.15	C6
	Shuffle	1987.08.19	F4
	Shuffle	1993.07.20	C5
	Discharge	1996.11.28	C5
F-2-14	Load	1987.08.21	G4
	Discharge	1996.10.18	G4
F-2-02	Load	1986.06.05	D3
	Shuffle	1987.08.18	F6
	Discharge	1996.11.28	F6

表6.1-7 TRIGA-LEU 8.5/20燃料元件 F-2-21之燃耗值

Pos. NO.	Burnup Value (%)										F/AVE-1	AVE-2/AVE-1
	A <sup>a</sup>	B <sup>b</sup>	C <sup>c</sup>	D <sup>d</sup>	E <sup>e</sup>	AVE-1 <sup>A-1</sup>	F <sup>f</sup>	G <sup>g</sup>	H <sup>h</sup>	AVE-2 <sup>A-2</sup>		
Rod NO. 10126												
1	1.93	1.92	2.05	1.94	1.91	1.95	2.00	-	1.95	-	1.03	-
2	3.21	3.17	3.06	3.20	3.22	3.18	3.10	-	3.30	-	0.97	-
3	4.36	4.30	4.34	4.33	4.22	4.29	4.37	4.25	4.29	4.30	1.02	1.00
4	5.20	5.27	5.27	5.33	5.09	5.21	5.35	5.43	5.46	5.41	1.03	1.04
5	5.59	5.70	5.52	5.54	5.62	5.58	5.78	5.84	5.80	5.81	1.04	1.04
6	5.69	5.60	5.50	5.78	5.59	5.63	5.68	5.74	5.76	5.73	1.01	1.02
7	4.82	4.88	4.85	4.98	4.90	4.89	4.95	4.69	5.05	4.90	1.01	1.00
8	3.58	3.56	3.52	3.61	3.59	3.58	3.61	3.49	3.71	3.60	1.01	1.01
Rod NO. 10127												
1	1.74	1.78	1.87	1.98	1.81	1.83	1.81	-	1.90	-	0.99	-
2	2.87	2.87	2.99	2.79	2.88	2.88	2.92	-	2.86	-	1.01	-
3	3.90	3.98	4.06	3.96	3.91	3.95	4.04	3.87	4.15	4.02	1.02	1.02
4	4.73	4.89	5.14	5.00	4.95	4.94	4.97	5.01	5.04	5.01	1.01	1.01
5	5.27	5.38	5.17	5.44	5.32	5.31	5.46	5.31	5.35	5.37	1.03	1.01
6	5.42	5.34	5.22	5.44	5.29	5.33	5.42	5.19	5.42	5.34	1.02	1.00
7	4.71	4.71	4.65	4.93	4.91	4.80	4.70	4.78	4.77	4.75	0.98	0.99
8	3.53	3.47	3.43	3.63	3.55	3.53	3.55	3.62	3.63	3.60	1.01	1.02
Rod NO. 10128												
1	1.84	1.90	1.83	1.78	1.79	1.82	1.90	-	1.95	-	1.04	-
2	3.11	3.09	3.05	3.25	3.14	3.13	3.14	-	3.25	-	1.00	-
3	4.17	4.24	4.05	4.30	4.14	4.18	4.30	4.42	4.30	4.34	1.03	1.04
4	5.30	5.24	5.01	5.20	5.14	5.17	5.31	5.15	5.23	5.23	1.03	1.01
5	5.76	5.80	5.55	5.97	5.76	5.77	5.88	5.99	5.80	5.86	1.02	1.02
6	5.30	5.43	5.48	5.52	5.27	5.38	5.51	5.56	5.46	5.51	1.02	1.02
7	4.74	4.70	4.70	4.80	4.65	4.71	4.77	4.58	4.77	4.71	1.01	1.00
8	3.45	3.54	3.47	3.54	3.41	3.47	3.59	3.58	3.67	3.61	1.03	1.04
Rod NO. 10129												
1	1.57	1.52	1.50	1.68	1.62	1.59	1.56	-	1.48	-	0.98	-
2	2.54	2.65	2.54	2.69	2.65	2.62	2.69	-	2.61	-	1.03	-
3	3.96	3.79	3.97	3.61	3.68	3.78	3.85	3.66	3.81	3.77	1.02	1.00
4	4.55	4.65	4.52	4.55	4.73	4.62	4.72	4.87	4.66	4.75	1.02	1.03
5	5.21	5.14	5.16	5.44	5.12	5.20	5.22	4.96	5.31	5.16	1.00	0.99
6	5.13	5.21	5.31	5.32	5.35	5.28	5.20	4.97	5.38	5.18	0.98	0.98
7	4.64	4.59	4.61	4.65	4.61	4.62	4.71	4.73	4.61	4.68	1.02	1.01
8	3.36	3.42	3.44	3.38	3.47	3.42	3.47	3.38	3.37	3.41	1.01	1.00

<sup>a</sup> Deduced from <sup>97</sup>Nb-657.9keV

<sup>b</sup> Deduced from <sup>97</sup>Zr-743.4keV

<sup>c</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-667.7keV

<sup>d</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-772.6keV

<sup>e</sup> Deduced from <sup>140</sup>La-1596.5keV

<sup>A-1</sup> AVE-1=(A+B+C+D+E)/5

<sup>f</sup> Deduced from <sup>137</sup>Cs-661.7keV

<sup>g</sup> Deduced from <sup>134</sup>Cs/<sup>137</sup>Cs

<sup>h</sup> Deduced from <sup>106</sup>Ru/<sup>137</sup>Cs

<sup>A-2</sup> AVE-2=(F+G+H)/3

表6.1-8 TRIGA-LEU 8.5/20燃料元件 F-2-30之燃耗值

Pos. NO.	Burnup Value (%)										F/AVE-1	AVE-2/AVE-1
	A <sup>a</sup>	B <sup>b</sup>	C <sup>c</sup>	D <sup>d</sup>	E <sup>e</sup>	AVE-1 <sup>A-1</sup>	F <sup>f</sup>	G <sup>g</sup>	H <sup>h</sup>	AVE-2 <sup>A-2</sup>		
Rod NO. 8514												
1	17.67	19.07	19.56	19.89	19.26	19.12	18.75	19.07	18.85	18.89	0.98	0.99
2	27.60	26.88	26.08	25.78	26.86	26.68	26.72	25.90	26.07	26.23	1.00	0.98
3	32.71	33.00	33.01	32.44	33.40	33.00	32.97	31.89	33.49	32.78	1.00	0.99
4	36.46	36.50	35.24	35.58	35.99	35.96	36.55	34.53	36.81	35.96	1.02	1.00
5	34.94	35.45	35.05	35.08	35.39	35.22	35.47	35.61	35.60	35.56	1.01	1.01
6	33.02	32.44	31.74	31.43	32.46	32.26	32.39	30.87	32.57	31.94	1.00	0.99
7	28.28	26.66	25.66	25.79	26.27	26.49	26.47	24.73	25.87	25.69	1.00	0.97
8	18.02	18.53	19.07	18.89	19.17	18.81	18.15	17.52	18.32	18.00	0.96	0.99
Rod NO. 8516												
1	14.99	15.43	15.91	16.76	15.27	15.61	15.03	15.40	14.94	15.12	0.96	0.97
2	21.46	22.44	22.07	22.01	22.75	22.25	22.19	21.85	22.22	22.09	1.00	0.99
3	27.74	27.64	26.60	26.54	28.93	27.73	27.52	25.88	27.81	27.07	0.99	0.98
4	31.09	31.01	30.03	29.93	30.86	30.63	30.96	29.34	30.97	30.42	1.01	0.99
5	31.17	31.23	30.43	30.84	31.28	31.04	31.20	29.74	31.45	30.80	1.01	0.99
6	29.86	28.80	28.80	28.62	28.95	29.00	28.73	27.44	27.85	28.01	0.99	0.97
7	22.31	23.61	23.48	23.25	23.85	23.39	23.42	24.43	23.16	23.67	1.00	1.01
8	15.53	16.40	17.00	16.57	16.37	16.38	16.08	15.10	15.52	15.57	0.98	0.95
Rod NO. 8517												
1	13.56	13.60	13.64	13.87	13.35	13.56	13.68	12.88	13.00	13.25	1.01	0.98
2	22.84	22.16	21.73	23.10	22.53	22.48	22.38	21.62	22.22	22.07	1.00	0.98
3	32.31	31.76	31.86	31.10	32.80	32.11	32.15	32.81	31.73	32.23	1.00	1.00
4	36.91	36.42	36.69	36.94	37.22	36.90	36.89	36.33	37.16	36.79	1.00	1.00
5	38.34	36.84	37.23	37.63	37.75	37.59	37.32	37.14	38.23	37.56	0.99	1.00
6	35.02	33.97	34.35	33.50	34.45	34.29	35.41	35.31	35.39	35.37	1.03	1.03
7	28.84	27.85	28.76	29.46	28.39	28.62	28.20	28.19	28.69	28.36	0.99	0.99
8	19.21	18.20	18.97	18.07	19.34	18.86	18.41	18.70	18.25	18.45	0.98	0.98
Rod NO. 8518												
1	14.74	14.69	15.08	15.21	14.56	14.82	14.78	13.89	14.94	14.54	1.00	0.98
2	23.83	24.17	24.15	24.75	25.22	24.56	23.90	24.61	24.14	24.22	0.97	0.99
3	34.90	33.73	33.61	33.33	33.74	33.84	34.13	32.05	33.58	33.25	1.01	0.98
4	39.49	38.93	39.04	37.75	38.94	38.85	39.41	37.17	39.00	38.53	1.01	0.99
5	40.54	39.68	40.34	40.02	40.42	40.24	39.60	38.19	40.20	39.33	0.98	0.98
6	37.43	37.08	37.56	38.23	38.63	37.93	37.52	36.44	37.68	37.21	0.99	0.98
7	30.82	30.40	31.52	30.69	31.13	30.95	30.72	30.44	31.44	30.87	0.99	1.00
8	20.29	20.79	20.76	20.49	20.94	20.70	20.94	21.26	21.07	21.09	1.01	1.02

<sup>a</sup> Deduced from <sup>97</sup>Nb-657.9keV

<sup>b</sup> Deduced from <sup>97</sup>Zr-743.4keV

<sup>c</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-667.7keV

<sup>d</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-772.6keV

<sup>e</sup> Deduced from <sup>140</sup>La-1596.5keV

<sup>A-1</sup> AVE-1=(A+B+C+D+E)/5

<sup>f</sup> Deduced from <sup>137</sup>Cs-661.7keV

<sup>g</sup> Deduced from <sup>134</sup>Cs/<sup>137</sup>Cs

<sup>h</sup> Deduced from <sup>106</sup>Ru/<sup>137</sup>Cs

<sup>A-2</sup> AVE-2=(F+G+H)/3

表6.1-9 TRIGA-LEU 20/20燃料元件 F-2-14之燃耗值

Pos. NO.	Burnup Value (%)										F/AVE-1	AVE-2/AVE-1
	A <sup>a</sup>	B <sup>b</sup>	C <sup>c</sup>	D <sup>d</sup>	E <sup>e</sup>	AVE-1 <sup>A-1</sup>	F <sup>f</sup>	G <sup>g</sup>	H <sup>h</sup>	AVE-2 <sup>A-2</sup>		
Rod NO. 10062												
1	3.21	3.30	3.21	3.16	3.32	3.26	3.30	-	-	-	1.01	-
2	5.25	5.22	5.41	5.41	5.17	5.27	5.37	-	-	-	1.02	-
3	7.58	7.63	7.81	7.54	7.69	7.66	7.63	7.41	7.61	7.55	1.00	0.99
4	9.28	9.16	9.55	9.44	9.48	9.40	9.43	9.44	9.66	9.51	1.00	1.01
5	10.42	10.34	10.34	10.23	10.17	10.28	10.36	10.27	10.27	10.30	1.01	1.00
6	9.97	10.05	10.13	10.10	9.96	10.03	10.06	10.47	9.95	10.16	1.00	1.01
7	8.83	8.68	8.68	8.75	8.95	8.81	8.70	8.54	8.62	8.62	0.99	0.98
8	7.61	7.52	7.45	7.59	7.52	7.54	7.53	7.87	7.40	7.60	1.00	1.01
Rod NO. 10064												
1	3.05	2.97	3.04	3.09	3.09	3.06	3.00	-	-	-	0.98	-
2	5.38	5.12	5.26	5.22	5.16	5.22	5.13	-	-	-	0.98	-
3	7.21	7.30	7.39	7.25	7.21	7.26	7.31	7.36	7.57	7.41	1.01	1.02
4	8.93	8.89	8.65	8.91	8.88	8.86	8.91	8.62	9.09	8.87	1.01	1.00
5	9.78	9.77	9.95	9.98	9.87	9.87	9.78	9.60	9.69	9.69	0.99	0.98
6	9.20	9.36	9.18	9.47	9.22	9.28	9.48	9.64	9.36	9.49	1.02	1.02
7	8.27	8.13	8.40	8.06	7.93	8.12	8.15	8.08	8.00	8.08	1.00	1.00
8	5.71	5.88	5.94	5.52	5.95	5.83	5.89	5.58	6.13	5.87	1.01	1.01
Rod NO. 10065												
1	2.70	2.66	2.56	2.66	2.66	2.66	2.67	-	-	-	1.00	-
2	4.16	4.20	4.30	4.17	4.26	4.23	4.15	-	-	-	0.98	-
3	6.32	6.20	6.01	6.16	6.21	6.19	6.31	6.13	5.97	6.14	1.02	0.99
4	7.92	7.78	7.73	7.81	7.80	7.81	7.79	7.81	8.03	7.88	1.00	1.01
5	8.63	8.39	8.23	8.40	8.30	8.38	8.40	8.66	8.63	8.56	1.00	1.02
6	8.77	8.64	8.56	8.65	8.70	8.67	8.95	8.47	8.82	8.75	1.03	1.01
7	7.53	7.46	7.60	7.52	7.37	7.48	7.52	7.18	7.43	7.38	1.01	0.99
8	5.60	5.64	5.61	5.96	5.52	5.64	5.50	5.43	5.51	5.48	0.98	0.97
Rod NO. 10066												
1	2.69	2.62	2.53	2.51	2.57	2.58	2.67	-	-	-	1.03	-
2	4.25	4.30	4.41	4.25	4.42	4.36	4.31	-	-	-	0.99	-
3	6.36	6.26	6.15	6.22	6.38	6.29	6.27	6.07	6.47	6.27	1.00	1.00
4	8.17	8.19	8.43	8.21	8.38	8.29	8.16	8.29	7.99	8.15	0.98	0.98
5	9.49	9.24	9.31	9.23	9.21	9.28	9.25	9.23	9.01	9.16	1.00	0.99
6	9.01	9.44	9.44	9.38	9.53	9.39	9.45	9.24	9.21	9.30	1.01	0.99
7	8.24	8.40	8.19	8.25	8.66	8.40	8.42	8.78	8.41	8.54	1.00	1.02
8	6.31	6.47	6.72	6.28	6.62	6.50	6.48	6.57	6.56	6.54	1.00	1.01

<sup>a</sup> Deduced from <sup>97</sup>Nb-657.9keV

<sup>b</sup> Deduced from <sup>97</sup>Zr-743.4keV

<sup>c</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-667.7keV

<sup>d</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-772.6keV

<sup>e</sup> Deduced from <sup>140</sup>La-1596.5keV

<sup>A-1</sup> AVE-1=(A+B+C+D+E)/5

<sup>f</sup> Deduced from <sup>137</sup>Cs-661.7keV

<sup>g</sup> Deduced from <sup>134</sup>Cs/<sup>137</sup>Cs

<sup>h</sup> Deduced from <sup>106</sup>Ru/<sup>137</sup>Cs

<sup>A-2</sup> AVE-2=(F+G+H)/3



表6.1-10 TRIGA-LEU 20/20燃料元件 F-2-02之燃耗值

Pos. NO.	Burnup Value (%)						F <sup>f</sup>	G <sup>g</sup>	H <sup>h</sup>	AVE-2 <sup>A-2</sup>	F/AVE-1	AVE-2/AVE-1
	A <sup>a</sup>	B <sup>b</sup>	C <sup>c</sup>	D <sup>d</sup>	E <sup>e</sup>	AVE-1 <sup>A-1</sup>						
Rod NO. 9501												
1	1.95	1.81	1.79	1.87	1.86	1.86	1.80	-	-	-	0.97	-
2	3.33	3.37	3.27	3.15	3.34	3.30	3.35	-	-	-	1.02	-
3	7.17	6.81	6.67	6.80	6.68	6.80	6.78	6.92	6.82	6.84	1.00	1.01
4	10.63	10.06	10.37	10.15	9.87	10.16	10.03	9.92	9.99	9.98	0.99	0.98
5	10.64	10.94	10.88	10.82	11.10	10.91	10.91	11.28	10.98	11.06	1.00	1.01
6	10.74	10.46	10.74	10.58	10.67	10.64	10.23	10.78	10.43	10.48	0.96	0.98
7	8.62	8.53	8.63	8.43	8.33	8.48	8.50	8.64	8.55	8.56	1.00	1.01
8	5.97	5.61	5.56	5.87	5.81	5.77	5.59	5.72	5.47	5.59	0.97	0.97
Rod NO. 9502												
1	2.90	2.79	2.85	2.95	2.80	2.85	2.80	-	-	-	0.98	-
2	4.69	4.66	4.71	4.56	4.73	4.68	4.65	-	-	-	0.99	-
3	6.36	6.43	6.50	6.56	6.15	6.36	6.42	6.48	6.42	6.44	1.01	1.01
4	7.93	7.89	7.81	7.76	7.53	7.71	7.86	8.27	8.10	8.08	1.02	1.05
5	8.66	8.52	8.74	8.50	8.71	8.64	8.49	8.07	8.48	8.35	0.98	0.97
6	8.06	7.99	7.85	7.78	8.20	8.02	7.96	7.54	7.85	7.78	0.99	0.97
7	6.60	6.71	6.64	6.76	6.64	6.67	6.71	6.26	6.62	6.53	1.01	0.98
8	4.91	4.53	4.57	4.63	4.59	4.64	4.51	4.62	4.61	4.58	0.97	0.99
Rod NO. 9503												
1	1.58	1.75	1.75	1.72	1.79	1.73	1.76	-	-	-	1.02	-
2	3.44	3.18	3.15	3.06	3.30	3.24	3.17	-	-	-	0.98	-
3	7.18	6.61	6.65	6.56	6.82	6.78	6.59	6.48	6.46	6.51	0.97	0.96
4	9.17	9.82	9.99	9.85	9.62	9.68	9.95	10.22	9.61	9.93	1.03	1.03
5	10.12	10.90	10.92	10.97	10.70	10.72	10.87	11.21	10.98	11.02	1.01	1.03
6	11.03	10.18	10.46	10.14	10.31	10.37	10.15	10.49	10.15	10.26	0.98	0.99
7	7.71	8.37	8.60	8.66	8.18	8.28	8.34	8.04	8.56	8.31	1.01	1.00
8	5.94	5.58	5.92	5.27	5.47	5.50	5.56	5.80	5.48	5.61	1.01	1.02
Rod NO. 9504												
1	2.81	2.74	2.73	2.63	2.84	2.77	2.79	-	-	-	1.01	-
2	4.48	4.50	4.37	4.52	4.63	4.52	4.40	-	-	-	0.97	-
3	6.25	6.36	6.41	6.24	6.48	6.37	6.34	6.36	6.51	6.40	1.00	1.00
4	8.00	7.75	7.84	7.46	7.76	7.76	7.73	7.23	7.62	7.53	1.00	0.97
5	8.57	8.10	8.26	8.11	8.04	8.19	8.07	7.83	8.10	8.00	0.99	0.98
6	7.57	7.58	7.63	7.84	7.49	7.60	7.57	7.28	7.58	7.48	1.00	0.98
7	6.48	6.46	6.47	6.35	6.33	6.40	6.44	6.50	6.29	6.41	1.01	1.00
8	4.26	4.33	4.18	4.27	4.34	4.29	4.40	4.06	4.15	4.20	1.03	0.98

<sup>a</sup> Deduced from <sup>97</sup>Nb-657.9keV

<sup>b</sup> Deduced from <sup>97</sup>Zr-743.4keV

<sup>c</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-667.7keV

<sup>d</sup> Deduced from <sup>132</sup>I-772.6keV

<sup>e</sup> Deduced from <sup>140</sup>La-1596.5keV

<sup>A-1</sup> AVE-1=(A+B+C+D+E)/5

<sup>f</sup> Deduced from <sup>137</sup>Cs-661.7keV

<sup>g</sup> Deduced from <sup>134</sup>Cs/<sup>137</sup>Cs

<sup>h</sup> Deduced from <sup>106</sup>Ru/<sup>137</sup>Cs

<sup>A-2</sup> AVE-2=(F+G+H)/3

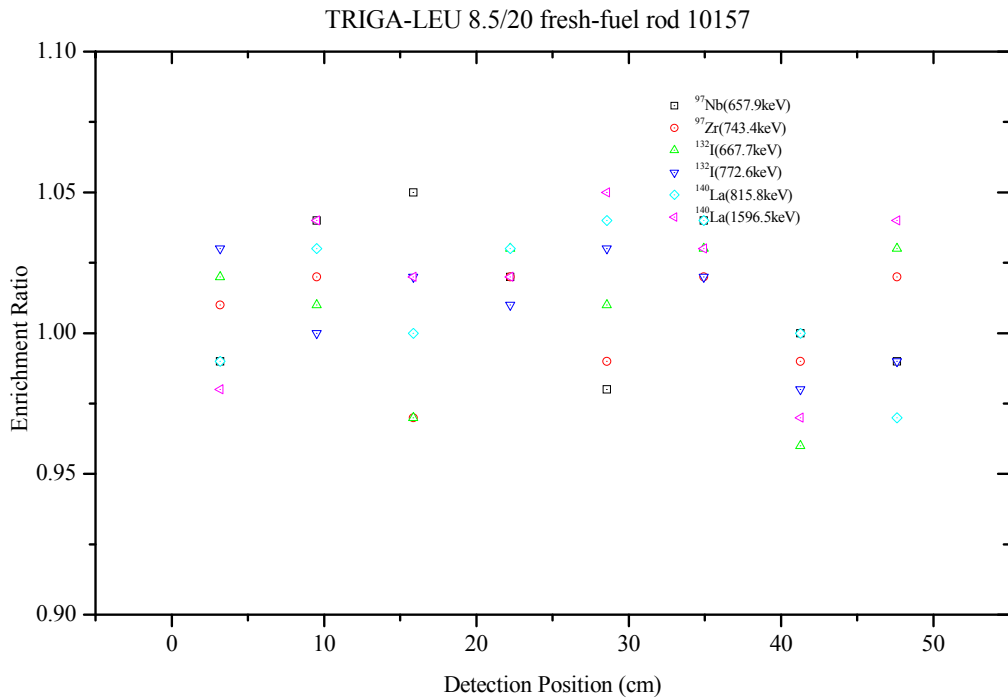


圖 6.1-1 (a) F-2-54 燃料元件中 10157 燃料棒  $^{235}\text{U}$  量測含量與廠商提供含量之比值

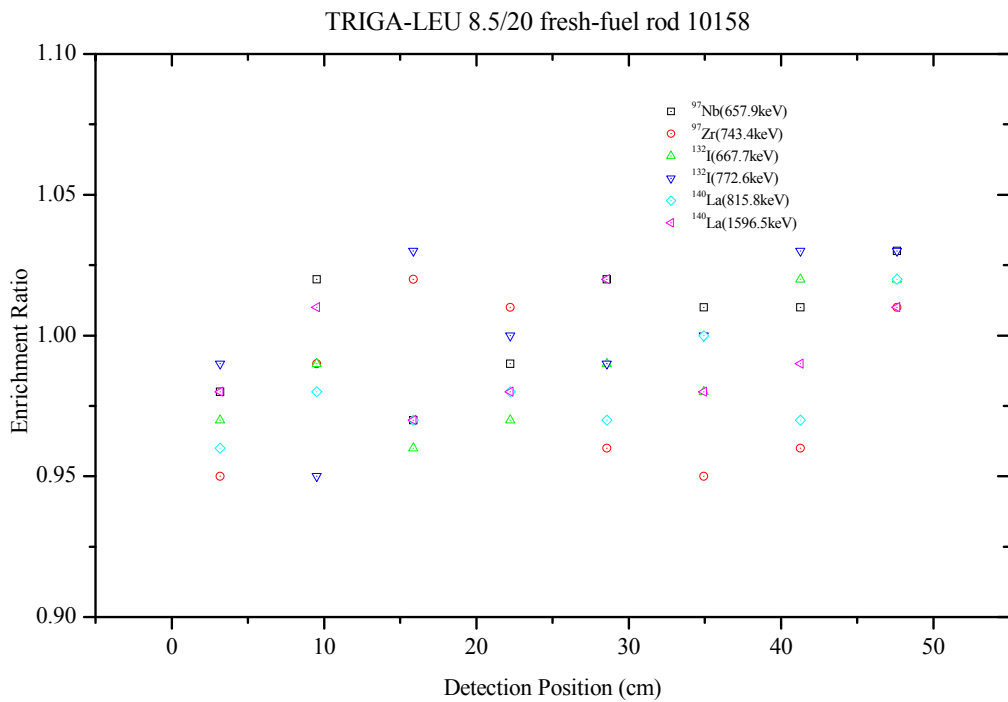


圖 6.1-1 (b) F-2-54 燃料元件中 10158 燃料棒  $^{235}\text{U}$  量測含量與廠商提供含量之比值

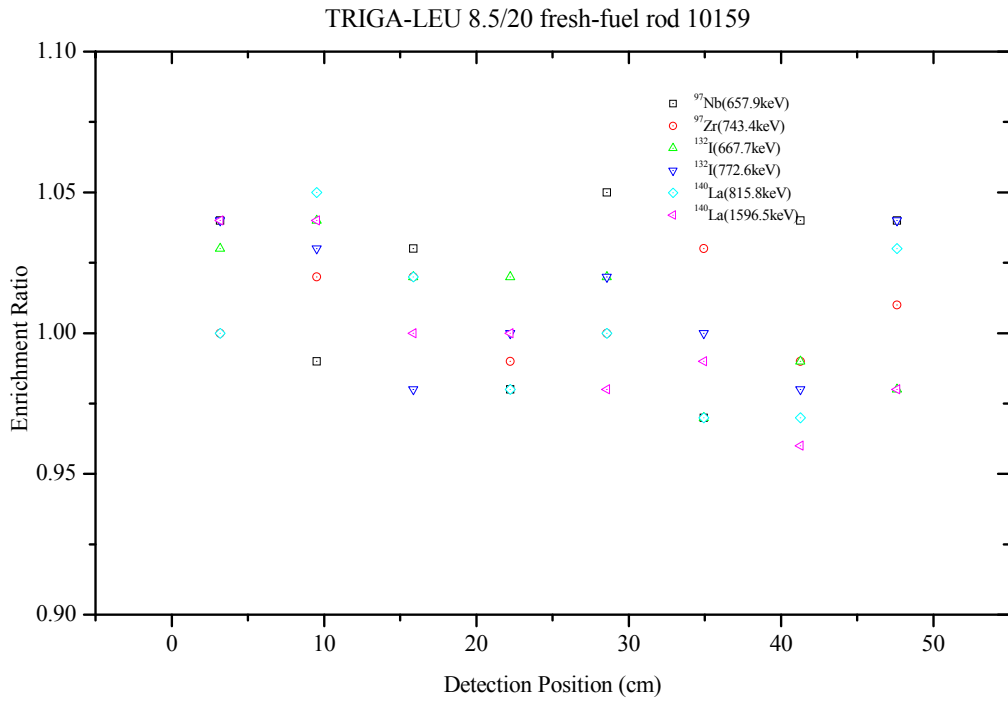


圖 6.1-1 (c) F-2-54 燃料元件中 10159 燃料棒  $^{235}\text{U}$  量測含量與廠商提供含量之比值

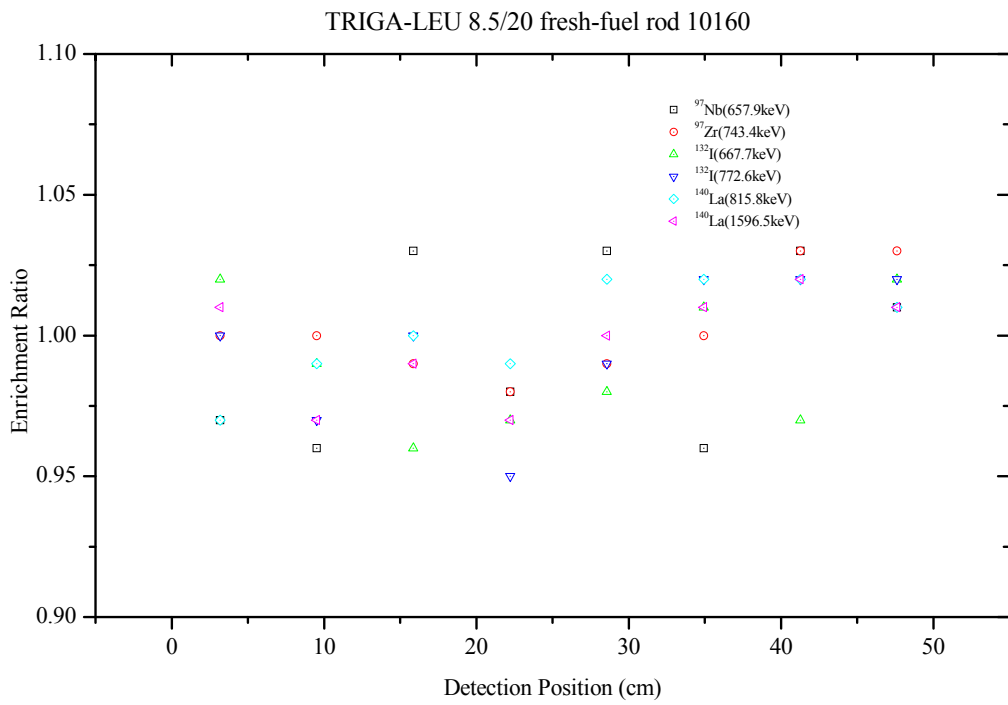


圖 6.1-1 (d) F-2-54 燃料元件中 10160 燃料棒  $^{235}\text{U}$  量測含量與廠商提供含量之比值

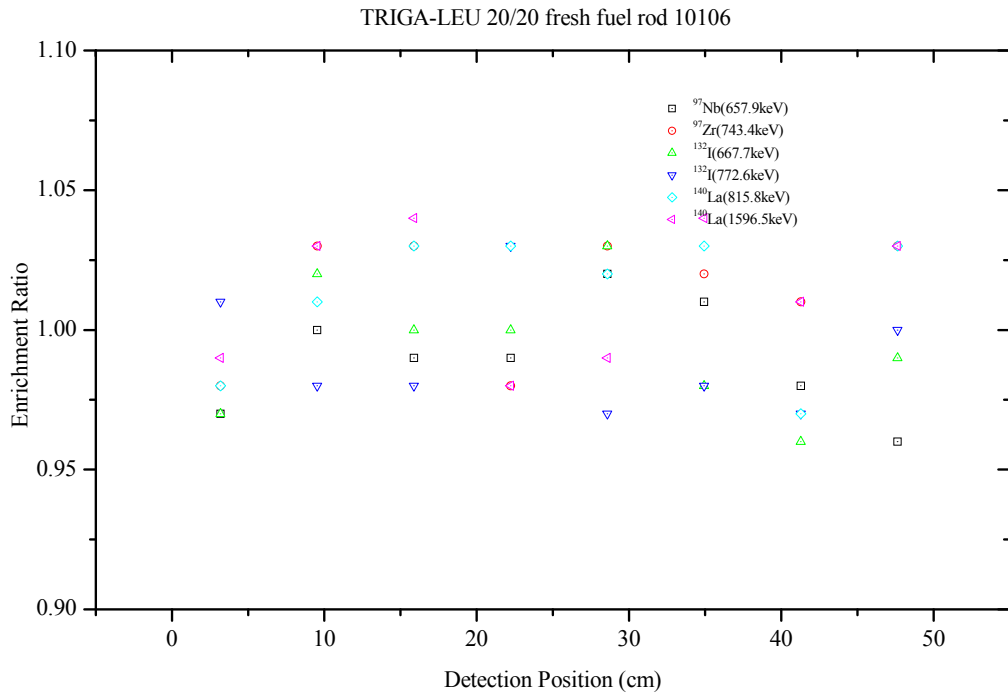


圖 6.1-2 (a) F-2-66 燃料元件中 10106 燃料棒  $^{235}\text{U}$  量測含量與廠商提供含量之比值

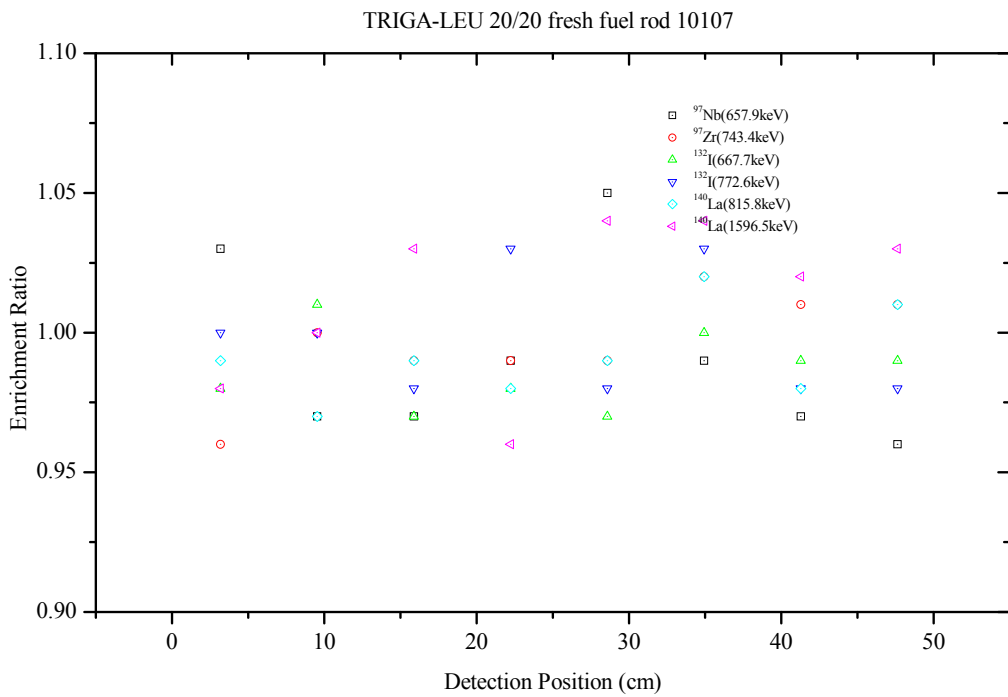


圖 6.1-2 (b) F-2-66 燃料元件中 10107 燃料棒  $^{235}\text{U}$  量測含量與廠商提供含量之比值

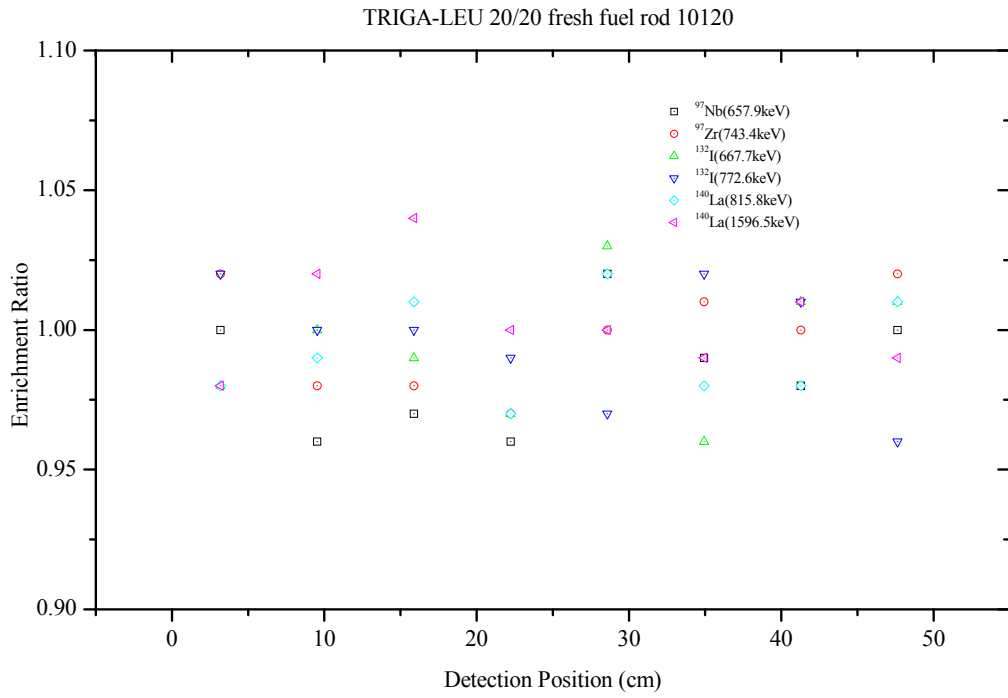


圖 6.1-2 (c) F-2-66 燃料元件中 10120 燃料棒  $^{235}\text{U}$  量測含量與廠商提供含量之比值

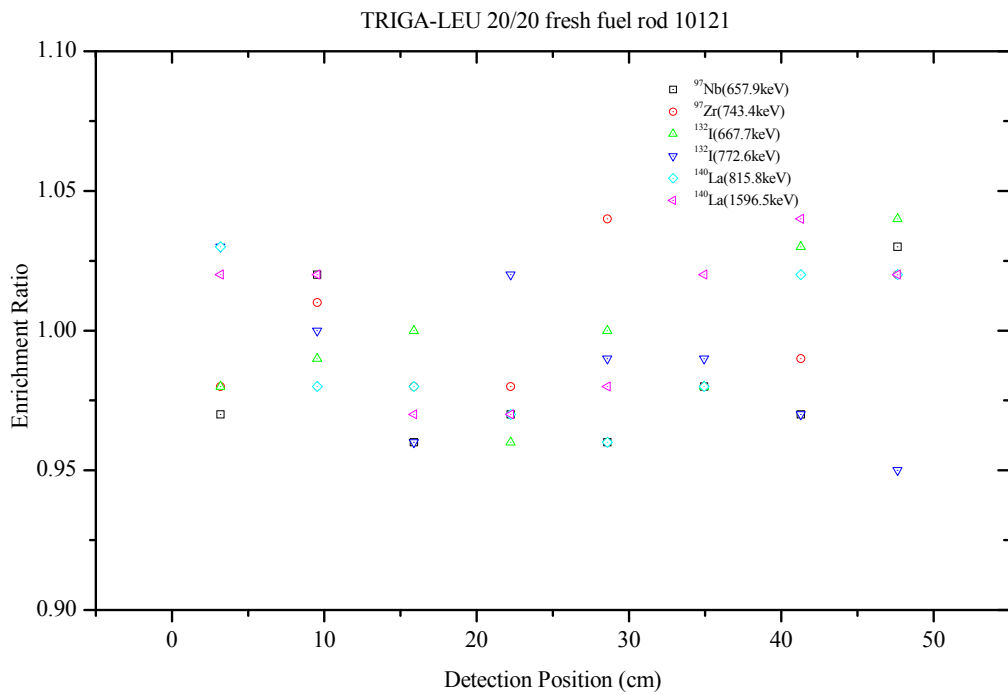


圖 6.1-2 (d) F-2-66 燃料元件中 10121 燃料棒  $^{235}\text{U}$  量測含量與廠商提供含量之比值

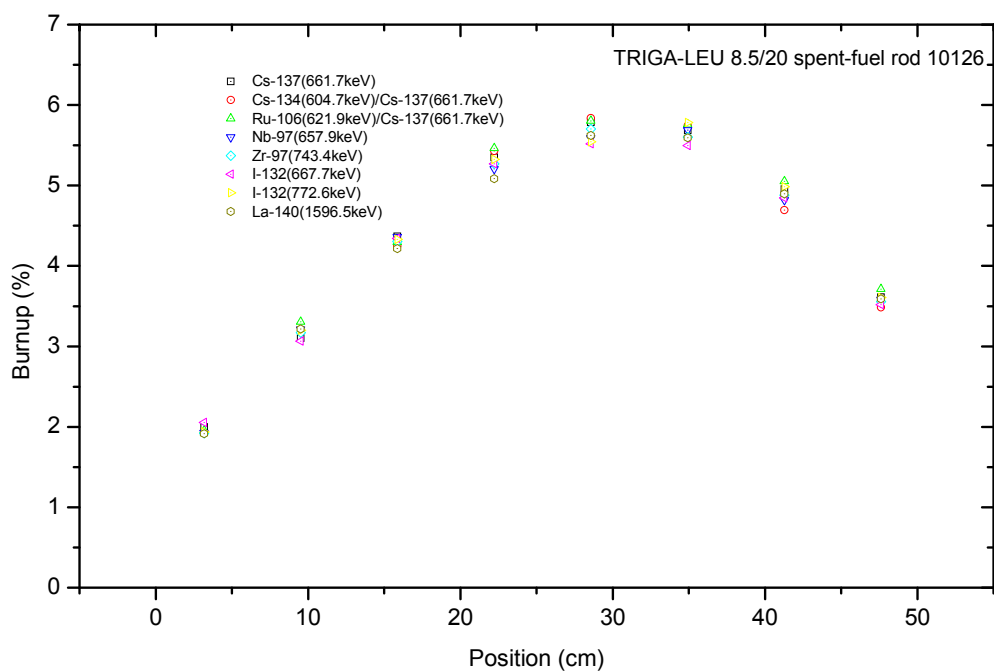


圖 6.1-3(a) F2-2-21 燃料元件中 10126 燃料棒之燃耗值

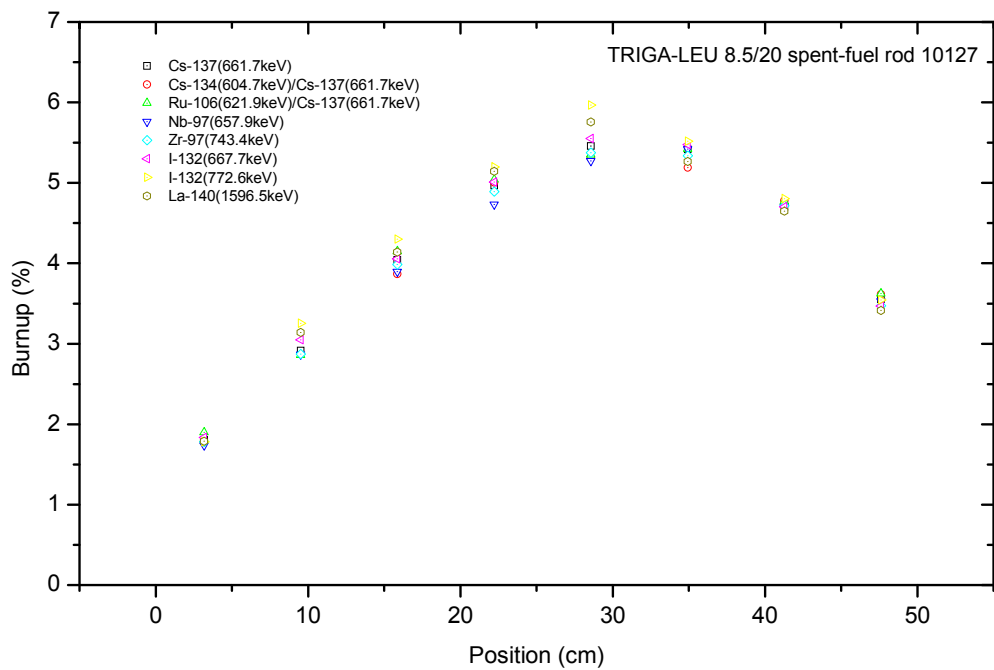


圖 6.1-3(b) F2-2-21 燃料元件中 10127 燃料棒之燃耗值

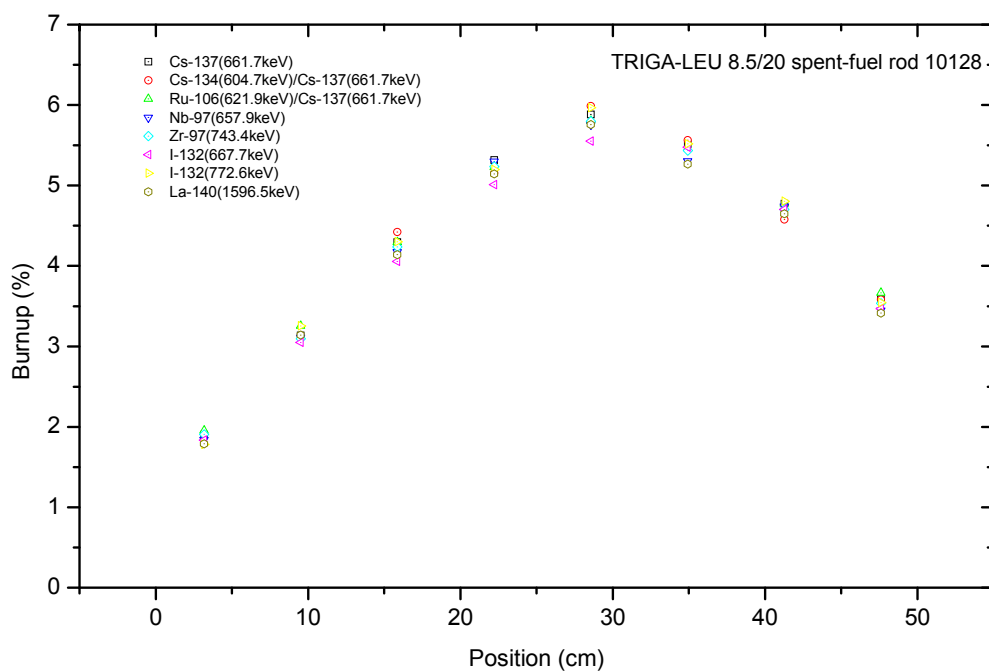


圖 6.1-3(c) F2-2-21 燃料元件中 10128 燃料棒之燃耗值

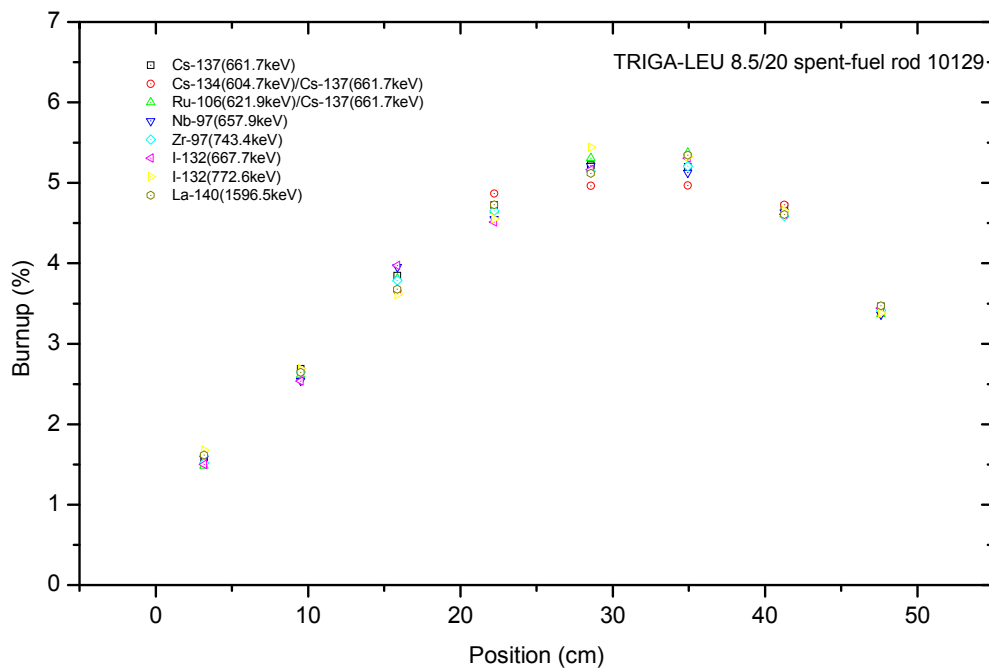


圖 6.1-3(d) F2-2-21 燃料元件中 10129 燃料棒之燃耗值

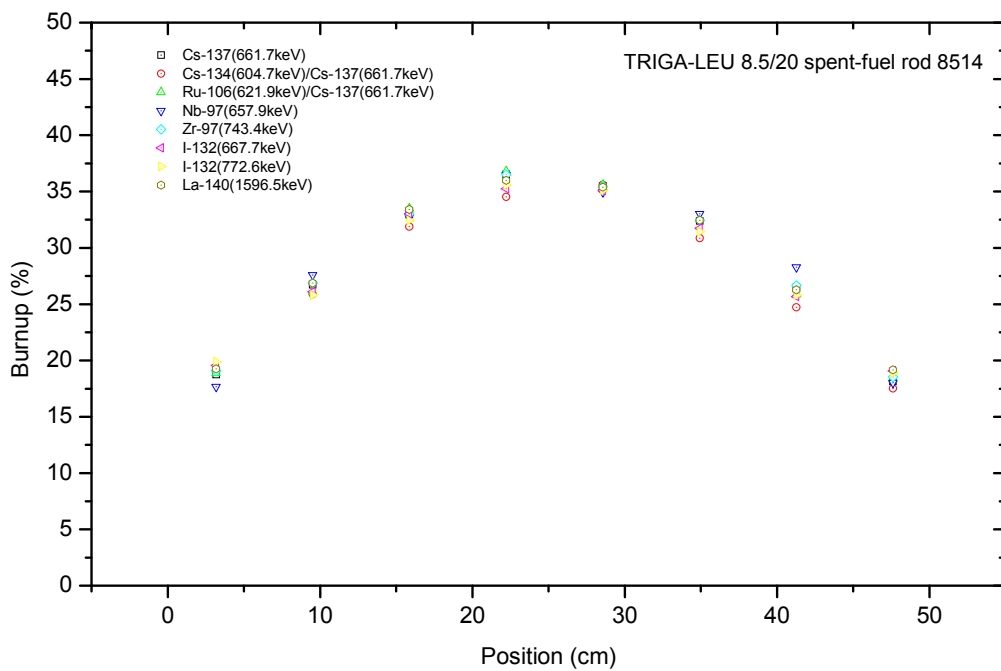


圖 6.1-4(a) F-2-30 燃料元件中 8514 燃料棒之燃耗值

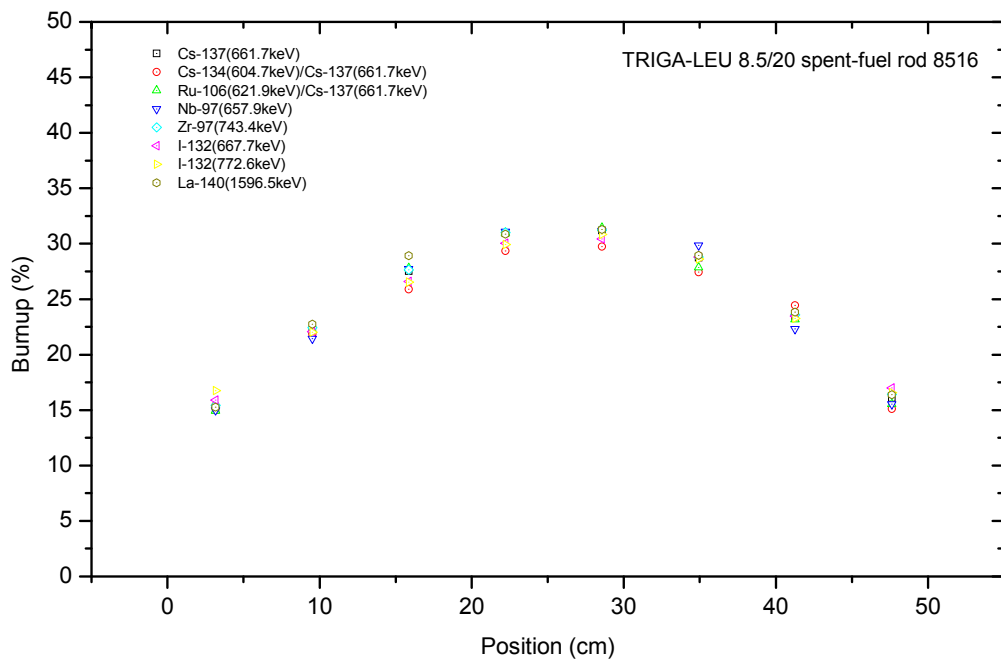


圖 6.1-4(b) F-2-30 燃料元件中 8516 燃料棒之燃耗值



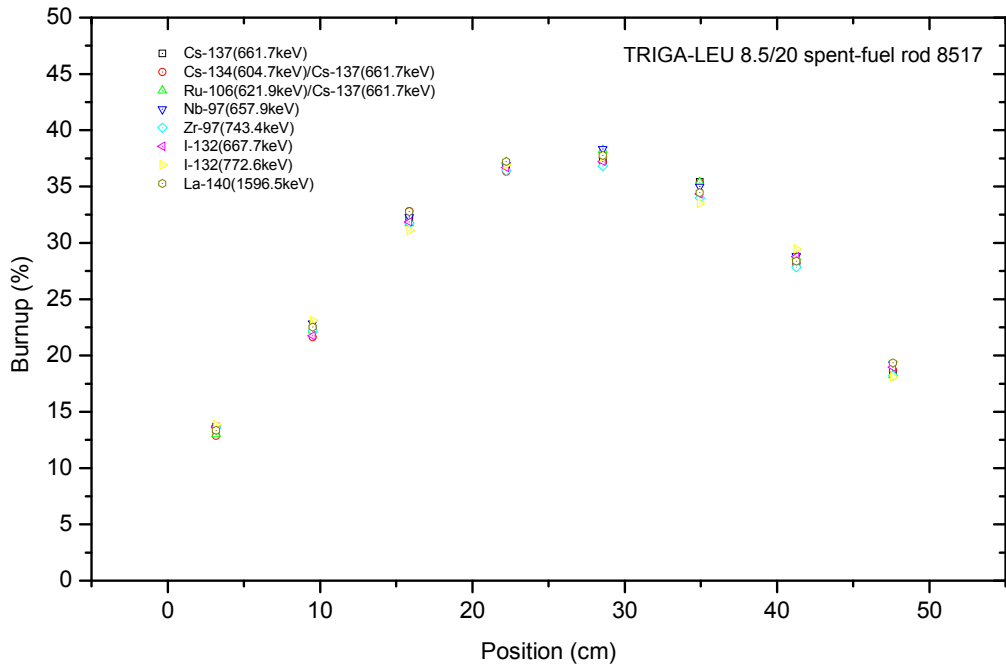


圖 6.1-4(c) F-2-30 燃料元件中 8517 燃料棒之燃耗值

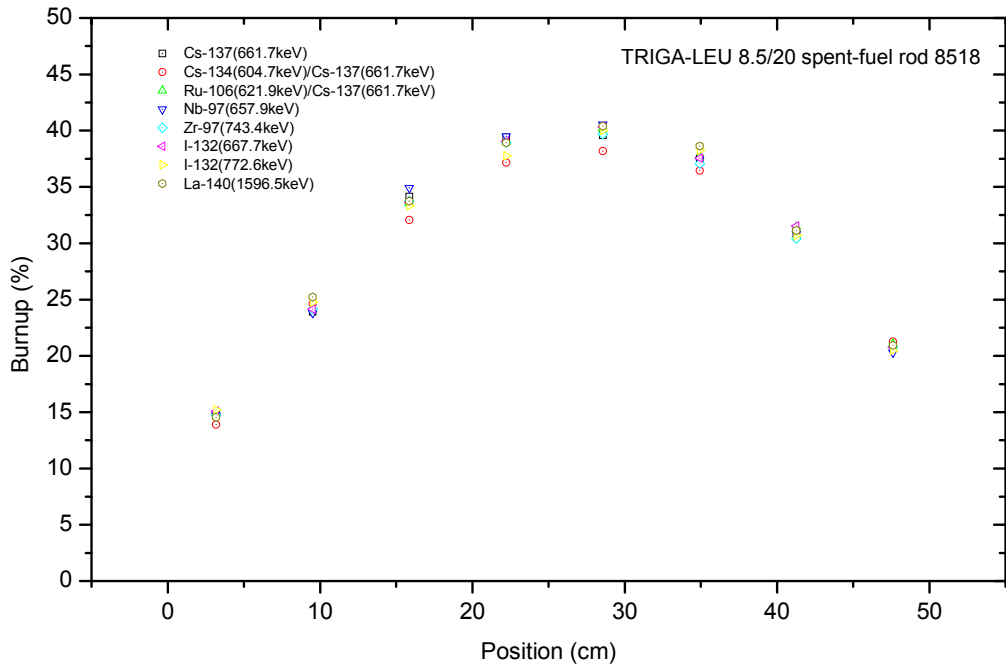


圖 6.1-4(d) F-2-30 燃料元件中 8518 燃料棒之燃耗值

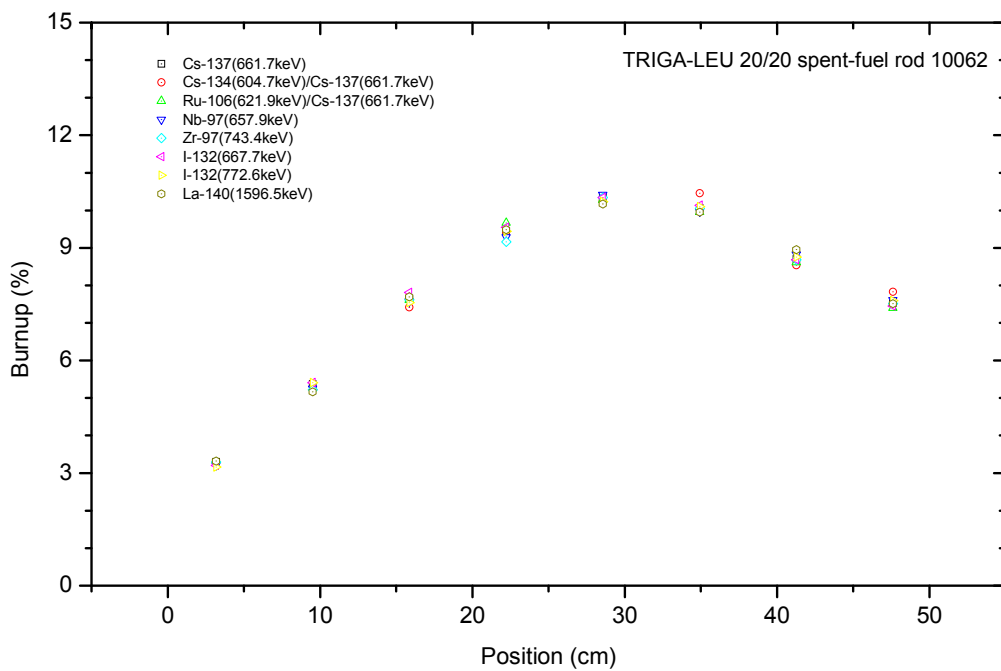


圖 6.1-5(a) F-2-14 燃料元件中 10062 燃料棒之燃耗值

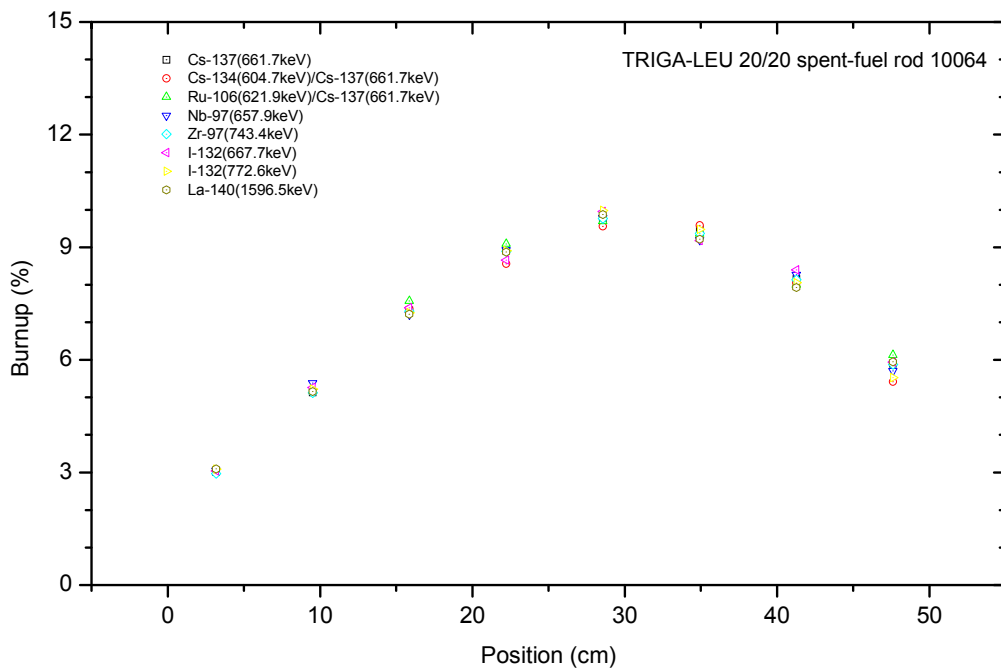


圖 6.1-5(b) F-2-14 燃料元件中 10064 燃料棒之燃耗值

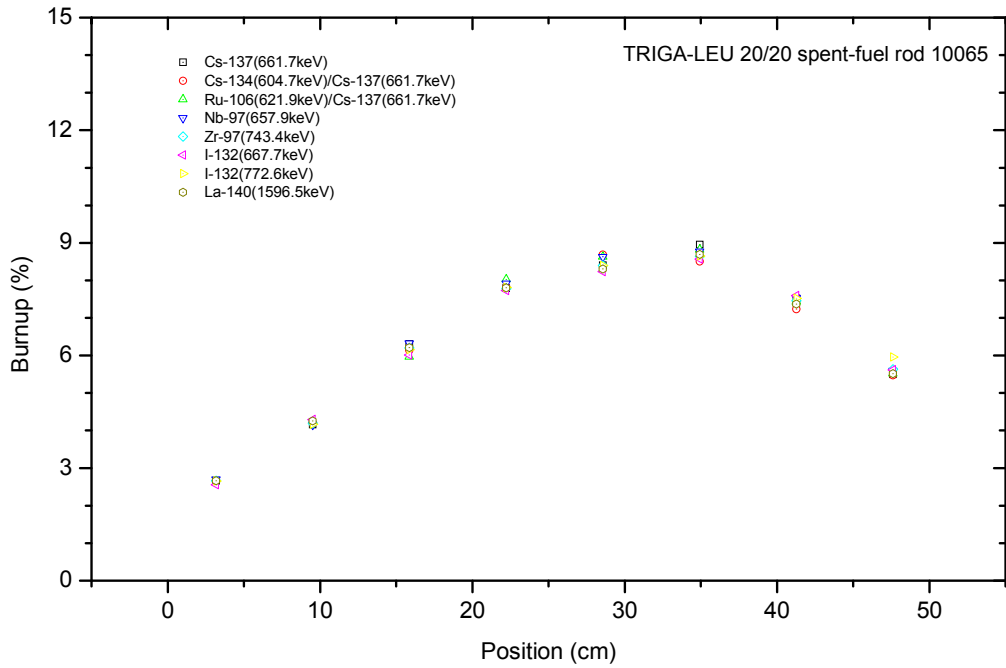


圖 6.1-5(c) F-2-14 燃料元件中 10065 燃料棒之燃耗值

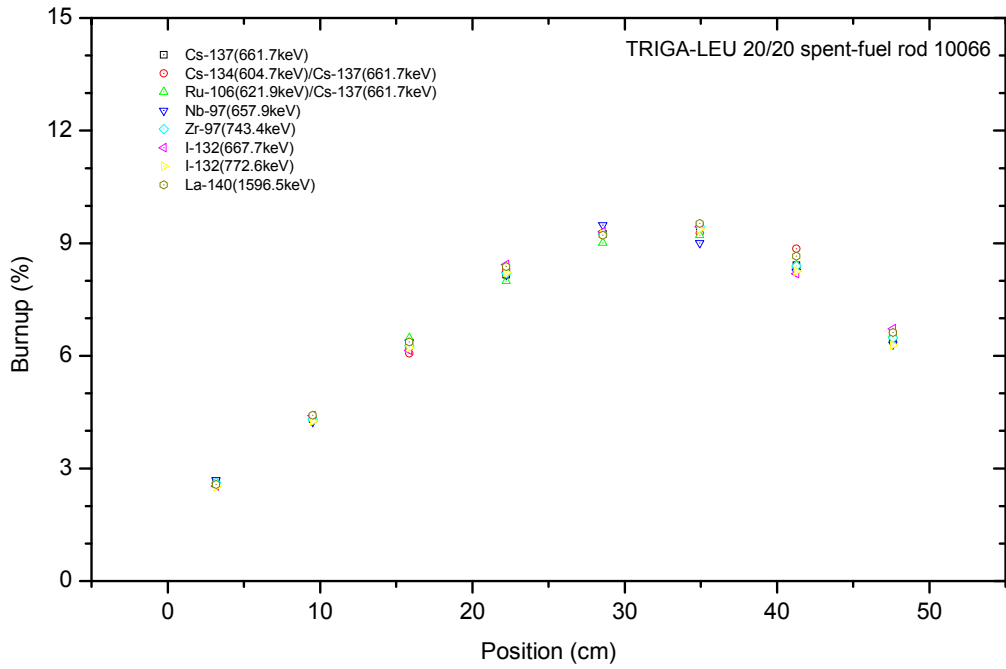


圖 6.1-5(d) F-2-14 燃料元件中 10066 燃料棒之燃耗值

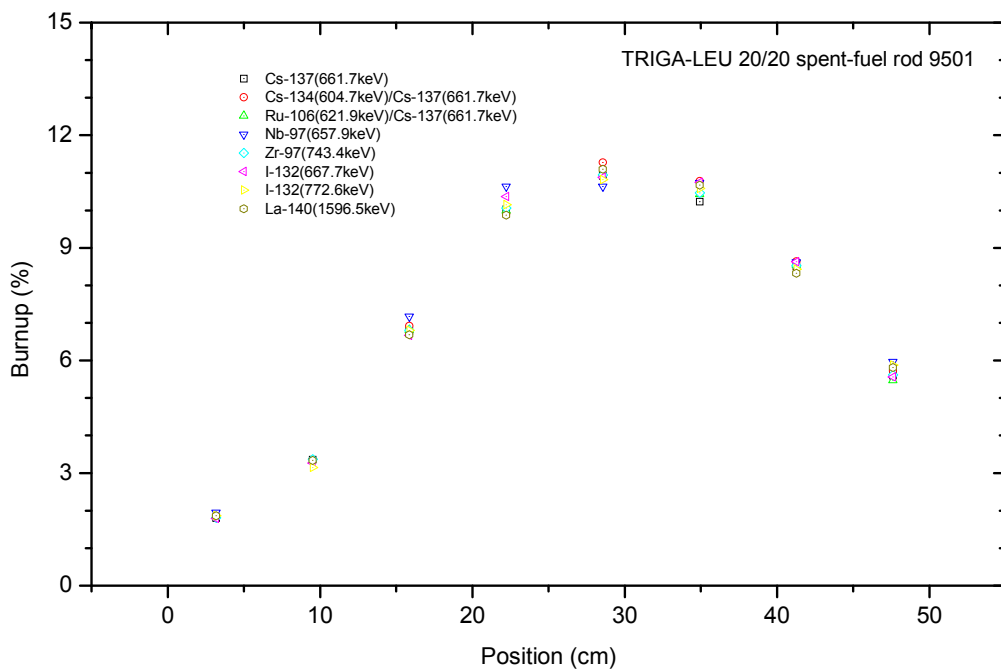


圖 6.1-6(a) F-2-02 燃料元件中 9501 燃料棒之燃耗值

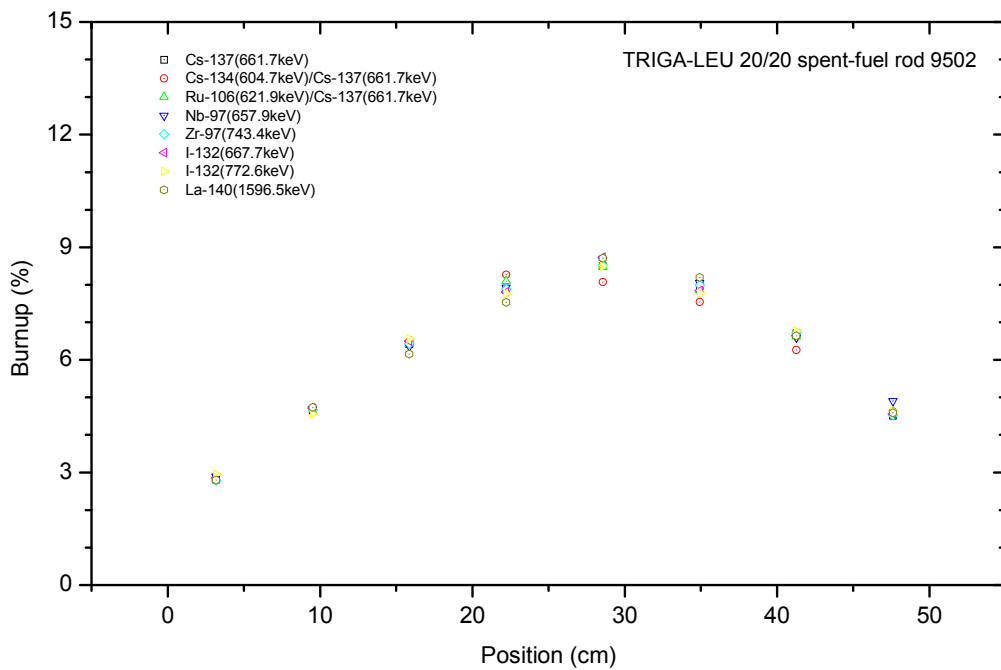


圖 6.1-6(b) F-2-02 燃料元件中 9502 燃料棒之燃耗值

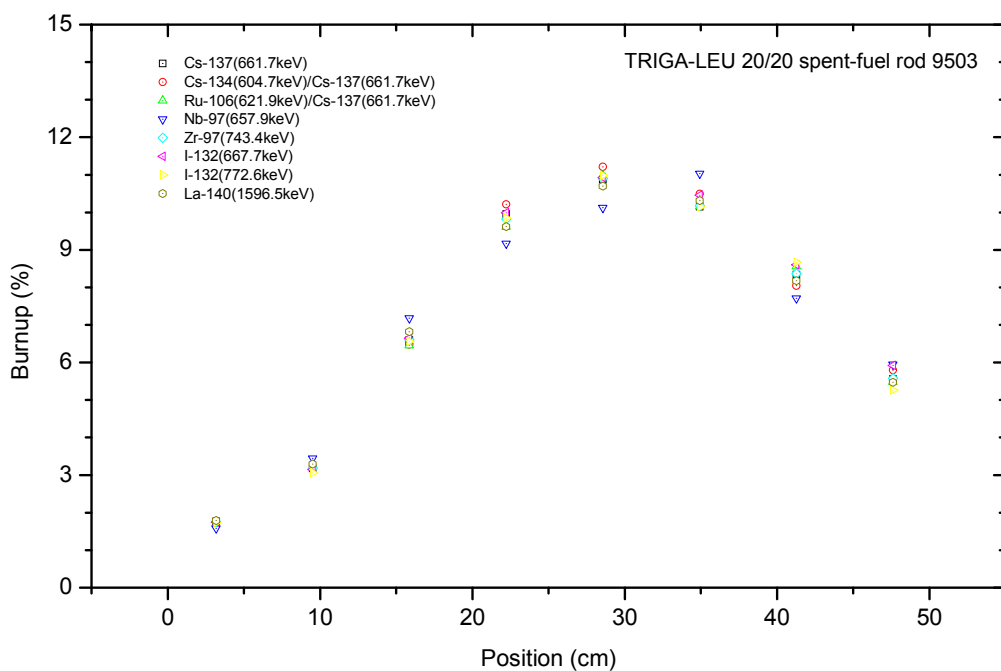


圖 6.1-6(c) F-2-02 燃料元件中 9503 燃料棒之燃耗值

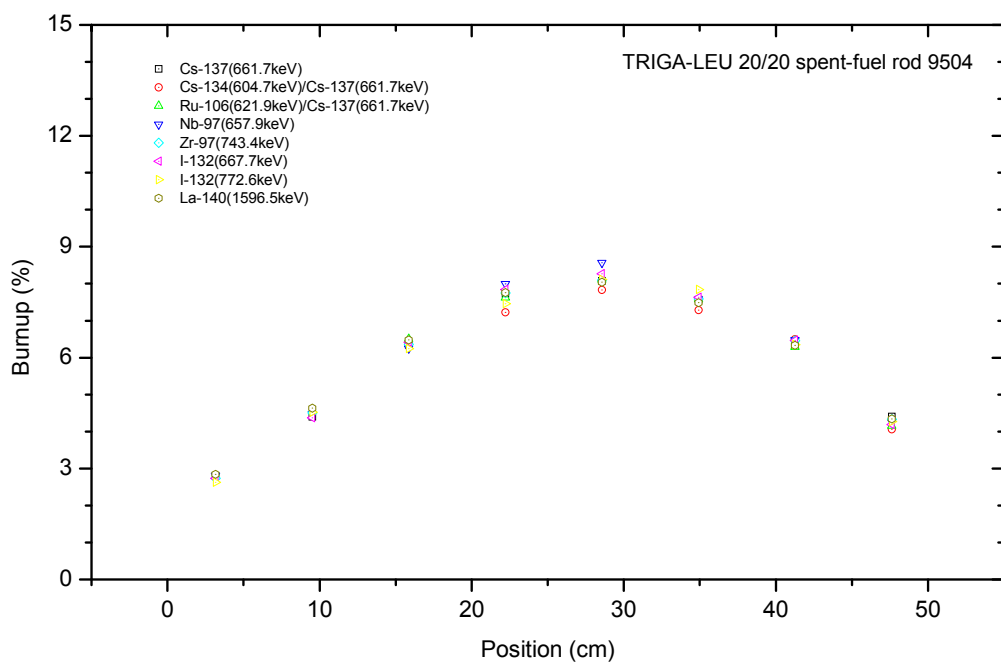


圖 6.1-6(d) F-2-02 燃料元件中 9504 燃料棒之燃耗值

## 6.2. 長半衰期分裂產物活度推導燃耗值

除了運用以上短半衰期分裂產物的方法決定燃耗值之外，另外也利用傳統長半衰期分裂產物  $^{137}\text{Cs}$  活度、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  活度比及  $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$  活度比的方法來決定燃耗值，以作為短半衰期方法的驗證，藉由兩者所得結果之比較，以其結果的一致程度來評估新方法之可行性。

$^{137}\text{Cs}$ 、 $^{134}\text{Cs}$  及  $^{106}\text{Ru}$  的半衰期分別是 30.17、2.06、及 1.02 年。 $^{137}\text{Cs}$  為直接分裂產物，其分裂產率大，加上半衰期長，故於燃料運轉照射期間會在燃料中堆積，因其活度高，故最常被用來作為燃料燃耗的指標。 $^{134}\text{Cs}$  則因分裂產率太低，主要是由  $^{133}\text{Cs}$  直接分裂產物經  $(n, \gamma)$  反應所產生，其也常作為燃料燃耗的指標，但其半衰期不夠長，因此並不足以像  $^{137}\text{Cs}$  那麼適當的表示出燃料的燃耗。不過因利用  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  活度比的方法，可繞過繁複的系統的絕對效率校正以及燃料屏蔽衰減因子的分析，故  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  活度比常被視為有用的燃耗指標。另外  $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$  活度比亦可作為良好的燃耗指標，而來自  $^{239}\text{Pu}$  分裂的  $^{106}\text{Ru}$  熱中子分裂產率 (4.29%) 大約是來自  $^{235}\text{U}$  分裂的 (0.40%) 11 倍，此可提供燃料中  $^{239}\text{Pu}$  及  $^{235}\text{U}$  含量之間的有用相對資訊。以下詳細說明利用  $^{137}\text{Cs}$  活度、 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  及  $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$

的活度比作燃耗指標，以疊代計算法來推導燃耗值的步驟與結果。

### 6.2.1. 由 $^{137}\text{Cs}$ 活度推導燃耗值

基於用過燃料中  $^{137}\text{Cs}$  之來源，主要係來自直接分裂產物，故

$^{137}\text{Cs}$  隨時間變化的數學式可表示為：

$$\frac{dN_i(t)}{dt} = -\lambda_i N_i(t) - \sigma_i^a \phi N_i(t) + Y_{125} \sigma_{25}^f \phi N_{25}(t) + Y_{149} \sigma_{49}^f \phi N_{49}(t) \quad (6.2-1)$$

經整理得：

$$\frac{dN_i(t)}{dt} + \lambda_i^* N_i(t) = Y_{125} \sigma_{25}^f \phi N_{25}(t) + Y_{149} \sigma_{49}^f \phi N_{49}(t) \quad (6.2-2)$$

再經推導得到  $^{137}\text{Cs}$  原子數密度的表示式如下：

$$N_i(t) = N_i^0 e^{-\lambda_i^* t} + Y_{125} \sigma_{25}^f \phi N_{25} \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \sigma_{25}^a \phi} + Y_{149} \sigma_{49}^f \phi N_{49} \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_i^* t}}{\lambda_i^* - \sigma_{49}^a \phi} \quad (6.2-3)$$

考慮 THOR 在長期運轉下，在最近一次運轉時所產生之  $^{137}\text{Cs}$

含量則可表示為：

$$N_i^i = N_i^{i-1} e^{-\lambda_i^* t^i} + Y_{125} \sigma_{25}^f \phi^i N_{25}^{i-1} \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi^i t^i} - e^{-\lambda_i^* t^i}}{\lambda_i^* - \sigma_{25}^a \phi^i} + Y_{149} \sigma_{49}^f \phi^i N_{49}^{i-1} \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi^i t^i} - e^{-\lambda_i^* t^i}}{\lambda_i^* - \sigma_{49}^a \phi^i} \quad (6.2-4)$$

其中

$N_i^i$ ：第  $i$  次運轉結束  $^{137}\text{Cs}$  含量

$N_l^{i-1}$  : 第  $i$  次運轉開始  $^{137}\text{Cs}$  含量

$N_{25}^{i-1}$  : 第  $i$  次運轉開始時  $^{235}\text{U}$  含量

$N_{49}^{i-1}$  : 第  $i$  次運轉開始  $^{239}\text{Pu}$  含量

$\phi^i$  : 第  $i$  次運轉中子通率

$t^i$  : 第  $i$  次運轉時間

式中下標 1、25、及 29 分別代表  $^{137}\text{Cs}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、及  $^{239}\text{Pu}$ ；上標  $i$ 、 $f$ 、及  $a$  分別代表、第  $i$  次運轉、分裂、及吸收。

由於 THOR 的運轉政策常隨同位素照射要求及學生實驗而改變，故每星期的運轉時數視實際需要而隨之調整，從整個運轉歷史來看，THOR 主要在 1MW 功率下以連續 24~38 小時的方式運轉，其詳細的運轉歷史很難確實的掌握。然而根據過去利用反覆計算法決定 MTR 燃料燃耗的文獻顯示，以每週 30 小時、40 小時連續照射、或每天 8 小時連續照射等不同的方式，分別作燃耗值的推算，其所得結果幾乎完全一致，顯示反覆計算決定燃料燃耗的方法與燃料之詳細照射歷史無關。<sup>1</sup> 藉由此疊代方法，假設與以上在同樣的連續照射方式下，選擇一組 TRIGA 燃料元件 F-2-30 進行燃耗值的分析，發現所得到的結果也幾乎完全一致。



在作燃耗計算時，所假設之狀況有：(1) 反應器的運轉週期為每週 24 小時連續運轉；(2) TRIGA 燃料在一固定分佈的平均中子通率之下照射；(3) 在每一時間區格  $t_i$  中燃料元件的  $^{235}\text{U}$  含量  $N_{25}$  與  $^{239}\text{Pu}$  含量  $N_{49}$  為常數，但在下一個時間區格進行計算的開始，則需要修正  $N_{25}$  與  $N_{49}$  的值。

在決定燃料燃耗時，首先根據假設的中子通率，以式 (6.2-4) 求得第  $i$  次運轉結束時  $^{137}\text{Cs}$  的含量，再代入式 (6.1-5) 求得計算活度  $A_{\text{cal}}$ ，並與 (5.4-14) 式求得的實驗活度  $A_{\text{exp}}$  相比較，根據  $A_{\text{exp}}/A_{\text{cal}}$  的比值加以調整假設的中子通率，並同時進行下一次的活度計算，如此反覆計算直到  $A_{\text{cal}}$  與  $A_{\text{exp}}$  的差值在千分之一的範圍內，此時的中子通率即可用下式來計算  $^{235}\text{U}$  剩餘量：

$$N_{25}^f = N_{25}^o e^{-\sum_i \sigma_{25}^f \phi^i t^i} \quad (6.2-5)$$

其中

$N_{25}^f$ ：用過燃料所剩餘的  $^{235}\text{U}$  含量

$N_{25}^o$ ：全新燃料中  $^{235}\text{U}$  的起始含量

再利用 (5.1-1) 式即可求得燃料的燃耗值。

此外在疊代計算中，需要將燃料待在爐心中的總時間作為計算

時的輸入參數，以確保計算值能單一收斂至實驗值。

### 6.2.2. 由 $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 活度比推導燃耗值

雖然用過燃料中之  $^{134}\text{Cs}$  為直接分裂產物，但由於其分裂產率極低（ $^{235}\text{U}$ ： $1.27 \times 10^{-50}\%$ ； $^{239}\text{Pu}$ ： $9.89 \times 10^{-40}\%$ ），故其產生主要來自直接分裂產物  $^{133}\text{Cs}$  經（n， $\gamma$ ）的反應， $^{134}\text{Cs}$  隨時間變化的數學式可表示為：

$$\frac{dN_m(t)}{dt} = -\lambda_m N_m(t) - \sigma_m^a \phi N_m(t) + \sigma_n^a \phi N_n(t) \quad (6.2-6)$$

式中忽略了直接分裂的部分，經整理上式得到：

$$\frac{dN_m(t)}{dt} + \lambda_m^* N_m(t) = \sigma_n^a \phi N_n(t) \quad (6.2-7)$$

再經推導得  $^{134}\text{Cs}$  原子數密度的表示式如下：

$$N_m(t) = N_m^0 e^{-\lambda_m^* t} + \frac{\sigma_n \phi Y_{n25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}}{\lambda_n^* - \sigma_{25}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_m^* t}}{\lambda_m^* - \sigma_{25}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_n^* t} - e^{-\lambda_m^* t}}{\lambda_m^* - \lambda_n^*} \right] \\ + \frac{\sigma_n \phi Y_{n49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}}{\lambda_n^* - \sigma_{49}^a \phi} \left[ \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_m^* t}}{\lambda_m^* - \sigma_{49}^a \phi} - \frac{e^{-\lambda_n^* t} - e^{-\lambda_m^* t}}{\lambda_m^* - \lambda_n^*} \right] \quad (6.2-8)$$

同樣地考慮 THOR 在長期運轉下，在最近一次運轉時所產生之

$^{134}\text{Cs}$  含量則可表示為：

$$N_m^i(t) = N_m^{i-1} e^{-\lambda_m^* t^i} + \frac{\sigma_n \phi^i Y_{n25} \sigma_{25}^f \phi^i N_{25}}{\lambda_n^* - \sigma_{25}^a \phi^i} \left[ \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi^i t^i} - e^{-\lambda_m^* t^i}}{\lambda_m^* - \sigma_{25}^a \phi^i} - \frac{e^{-\lambda_n^* t^i} - e^{-\lambda_m^* t^i}}{\lambda_m^* - \lambda_n^*} \right] \quad (6.2-9)$$

$$+ \frac{\sigma_n \phi^i Y_{n49} \sigma_{49}^f \phi^i N_{49}}{\lambda_n^* - \sigma_{49}^a \phi^i} \left[ \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi^i t^i} - e^{-\lambda_m^* t^i}}{\lambda_m^* - \sigma_{49}^a \phi^i} - \frac{e^{-\lambda_n^* t^i} - e^{-\lambda_m^* t^i}}{\lambda_m^* - \lambda_n^*} \right]$$

式中下標 m、n、25、及 29 分別代表  $^{134}\text{Cs}$ 、 $^{133}\text{Cs}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、及  $^{239}\text{Pu}$ ；

上標 i、f、及 a 分別代表第 i 次運轉、分裂及吸收。

在決定燃料燃耗時，首先根據假設的中子通率，以 (6.2-4) 及 (6.2-9) 式分別求得第 i 次運轉結束時  $^{137}\text{Cs}$  的含量  $N_i$  及  $^{134}\text{Cs}$  的含量  $N_m^i$ ，再代入 (6.1-5) 式分別得到計算活度  $A_{cal}^{134}$  及  $A_{cal}^{137}$ ，此一比值可以下式表示：

$$R_{cal} = \frac{\lambda_{134} \cdot N_{cal}^{134}}{\lambda_{137} \cdot N_{cal}^{137}} = A_{cal}^{134} / A_{cal}^{137} \quad (6.2-10)$$

另由可分別求得實驗活度  $A_{exp}^{134}$  及  $A_{exp}^{137}$ ，此實驗活度比值可以表示

如下：

$$R_{exp} = A_{exp}^{134} / A_{exp}^{137} = \frac{C_{605} / (\gamma_{605} \epsilon_{r,605})}{C_{661.7} / (\gamma_{661.7} \epsilon_{r,661.7})} \quad (6.2-11)$$

其中

$C_{605}$ ： $^{134}\text{Cs}$  能量 605keV 加馬能峰下之面積淨計數 (#/sec)

$\gamma_{605}$ ： $^{134}\text{Cs}$  能量 605keV 能峰的加馬分枝百分比強度

$\varepsilon_{r,605}$  : 能量 605keV 的相對效率

$C_{661.7}$  :  $^{137}\text{Cs}$  能量 605keV 加馬能峰下之面積淨計數 (#/sec)

$\gamma_{661.7}$  :  $^{137}\text{Cs}$  能量 661.7keV 能峰的加馬分枝百分比強度

$\varepsilon_{r,661.7}$  : 能量 661.7keV 的相對效率

而某一能峰的相對效率可以表示為：<sup>13,14</sup>

$$\varepsilon_{r,i} = \frac{C_i / \gamma_i}{C_o / \gamma_o} \quad (6.2-12)$$

其中

$C_o$  : 相對效率設定為 1 的加馬能峰 (605keV) 下之面積淨計數 (#/sec)

$C_i$  : 某一能峰  $i$  下之面積淨計數 (#/sec)

$\gamma_o$  : 相對效率設定為 1 之能峰 (605keV) 的加馬分枝百分比強度

$\gamma_i$  : 某一能峰  $i$  的加馬分枝百分比強度

由以上 (6.2-10) 及 (6.2-11) 式可得  $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$  活度比的比值，再根據此比值加以調整假設的平均中子通率，並進行下一次的活度

計算，如此反覆計算直到  $R_{cal}$  收斂至  $R_{exp}$  (收斂條件亦訂為千分之一)，同樣地此時的中子通率可運用於 (6.2-5) 式來計算並得到  $^{235}\text{U}$  剩餘量，並利用 (5.1-1) 式轉換成燃料的燃耗值。

### 6.2.3. 由 $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$ 活度比推導燃耗值

用過燃料中  $^{106}\text{Ru}$  之產生主要來自直接裂產物，由此得到  $^{106}\text{Ru}$  隨時間變化的數學式為：

$$\frac{dN_o(t)}{dt} = -\lambda_o N_o(t) - \sigma_o^a \phi N_o(t) + Y_{o25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}(t) + Y_{o49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}(t) \quad (6.2-13)$$

經整理得：

$$\frac{dN_o(t)}{dt} + \lambda_o^* N_o(t) = Y_{o25} \sigma_{25}^f \phi N_{25}(t) + Y_{o49} \sigma_{49}^f \phi N_{49}(t) \quad (6.2-14)$$

再經推導得到  $^{106}\text{Ru}$  原子數密度的表示式如下：

$$N_o(t) = N_o^0 e^{-\lambda_o^* t} + Y_{o25} \sigma_{25}^f \phi N_{25} \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi t} - e^{-\lambda_o^* t}}{\lambda_o^* - \sigma_{25}^a \phi} + Y_{o49} \sigma_{49}^f \phi N_{49} \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi t} - e^{-\lambda_o^* t}}{\lambda_o^* - \sigma_{49}^a \phi} \quad (6.2-15)$$

考慮 THOR 在長期運轉下，在最近一次運轉時所產生之  $^{106}\text{Ru}$  含量則可表示為：

$$\begin{aligned}
N_o^i = & N_o^{i-1} e^{-\lambda_o^* t^i} + Y_{o25} \sigma_{25}^f \phi^i N_{25}^{i-1} \frac{e^{-\sigma_{25}^a \phi^i t^i} - e^{-\lambda_o^* t^i}}{\lambda_o^* - \sigma_{25}^a \phi^i} \\
& + Y_{o49} \sigma_{49}^f \phi^i N_{49}^{i-1} \frac{e^{-\sigma_{49}^a \phi^i t^i} - e^{-\lambda_o^* t^i}}{\lambda_o^* - \sigma_{49}^a \phi^i}
\end{aligned} \tag{6.2-16}$$

式中下標 o、25、及 29 分別代表  $^{106}\text{Ru}$ 、 $^{235}\text{U}$ 、及  $^{239}\text{Pu}$ ；上標 i、f、及 a 分別代表第 i 次運轉、分裂、及吸收。

運用  $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$  活度比的方法來推導燃料燃耗值，其決定的步驟與 6.2.2 節中所敘述的相同，故不在此重述。

#### 6.2.4. 結果

運用以上長半衰期推導燃耗值的方法，於燃料進行再照射前，先對相同的四組燃料元件：F-2-21（8.5/20 型，號碼：10126、10127、10128、10129）、F-2-30（8.5/20 型，號碼：8514、8516、8517、8518）及 F-2-14（20/20 型，號碼：10062、10064、10065、10066）、F-2-02（20/20 型，號碼：9501、9502、9503、9504），進行燃耗實驗與評估，經分析後所得到的燃料元件燃耗值結果分別列於表 6.1-7~6.1-10 的 F、G、H 項，AVE-2 為這三項總和的平均。16 根 TRIGA 燃料棒的燃耗推導結果則表示於圖 6.1-3~6.1-6 中。以 AVE-2 為參考值，將 F（ $^{137}\text{Cs}$ ）、G（ $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ）、及 H（ $^{106}\text{Ru}/^{137}\text{Cs}$ ）項與其相比較，得知誤差分別在 4%、8%、及 7% 的範圍內。

### 6.3. 利用 SCALE/TRITON 進行標準尺度計算

本節燃耗的計算與比較，是以 THOR 的 TRIGA 長壽型燃料與標準型燃料為目標，並與前述 F-2-21、F-2-30、F-2-14、與 F-2-02 的測量結果進行比較。由於 F-2-30 以及 F-2-02 與早期 MTR 燃料同時使用的紀錄與相關資料缺乏，因此以全數更換為 TRIGA 燃料後的爐心佈局，且全新的燃料規格作為最初的模型進行燃耗計算，忽略 MTR 燃料對 TRIGA 燃料燃耗的影響。

另外，分析的燃料中有長壽型燃料與標準型燃料，且經歷不同的運轉週期，因此燃耗計算與測量結果的比較是一次重要的平行驗證，對於建立可靠的 TRIGA 用過燃料燃耗評估模式相當有幫助。

#### 6.3.1. THOR 爐心與 TRIGA 燃料

針對擬進行分析的 F-2-21、F-2-30、F-2-14、與 F-2-02 燃料，將運轉歷史以不同的爐心佈局分為 4 個運轉週期，並依實際的歷史資料整理出該週期的運轉天數、冷卻天數、運轉能量、與平均功率，列於表 6.3.1-1。在初步的計算模型中，將同週期同類型的燃料視為相同材料。

THOR 爐心與 TRIGA 燃料的詳細尺寸與材料可參考第 5.2 節。

表 6.3.1-1. 擬分析燃料的運轉資料

週期	運轉天數 (天)	冷卻天數 (天)	運轉能量 (MWD)	平均功率 (MW)
1	201	975	195	0.972
2	131	870	128	0.973
3	152	1014	148	0.971
4	6.8	34.2	6.8	1

### 6.3.2. SCALE/TRITON 程式

TRIGA 用過燃料的計算評估模式是以 SCALE 程式集中的燃耗計算控制模組 TRITON 進行分析。

如圖 6.3.2-1 所示，TRITON 以預測與修正的方法對特定的燃耗週期進行計算。首先，以初始的燃料原子密度與相關核數據資料進行遷移計算得到初始的中子通率分佈，以初始的燃料原子密度與中子通率分佈進行燃耗計算至燃耗週期的中間點，可預測得到中間點的燃料原子密度。接著，以中間點的燃料原子密度與相關核數據資料進行遷移計算得到中間點的中子通率分佈。最後，以中間點的燃料原子密度相關核數據資料與中子通率分佈，對初始的燃料原子密度進行該週期的燃耗計算。



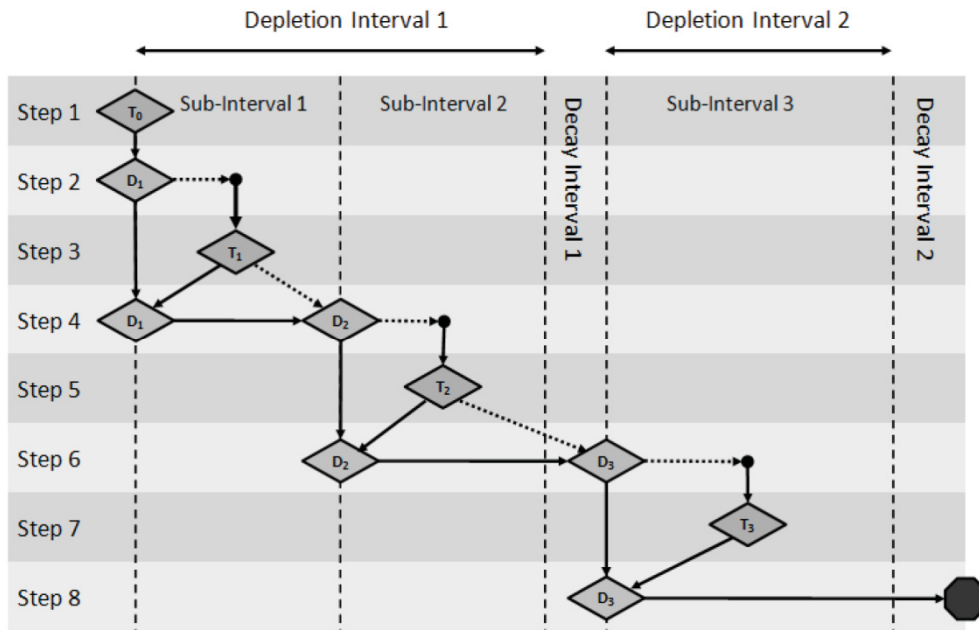


Figure T1.2.1. Predictor/corrector depletion algorithm used by TRITON.

圖 6.3.2-1. TRITON 燃耗計算的過程。

### 6.3.3. TRIGA 燃料的燃耗

根據實際的燃料佈局，建立 TRIGA 用過燃料的 TRITON 計算模型，列於圖 6.3.3-1 至圖 6.3.3-4。計算結果列於表 6.3.3-1。

計算結果顯示，考慮燃料中鈾的實際總重時，燃料的燃耗值偏低。由於 THOR 於運轉時控制板不會全出，未離開控制板的燃料區域對整體功率貢獻不大，燃耗情形小。因此計算時加入考慮部分鈾的重量，視有功率貢獻的燃料較實際的長度短。計算結果顯示，與測量的結果有相同的趨勢。F-2-21 僅使用第 3 週期，所以燃耗值最小。F-2-30 使用 4 個週期且與 MTR 燃料混用時間久，因此燃耗值最大。F-2-14 與 F-2-02 分別使用 3 個週期與 4 個週期，但由於第 4 個週期的運轉能量不多，F-2-14 與 F-2-02 的燃料值接近亦相當合理。

由於 F-2-30 曾與 MTR 燃料長時間混用，因此計算值較測量時低。但 F-2-21、F-2-14、與 F-2-02 燃料的計算值相當接近測量的結果，因此以 TRITON 建立 TRIGA 用過燃料的評估模式仍具有一定程度的可靠性。

表 6.3.3-1. TRIGA 用過燃料 TRITON 評估模式的計算結果

燃料	燃耗	
	考慮鈾總重	考慮部分鈾重
F-2-21	3.11%	6.45%
F-2-30	11.21%	21.69%
F-2-14	4.78%	9.59%
F-2-02	4.84%	9.70%

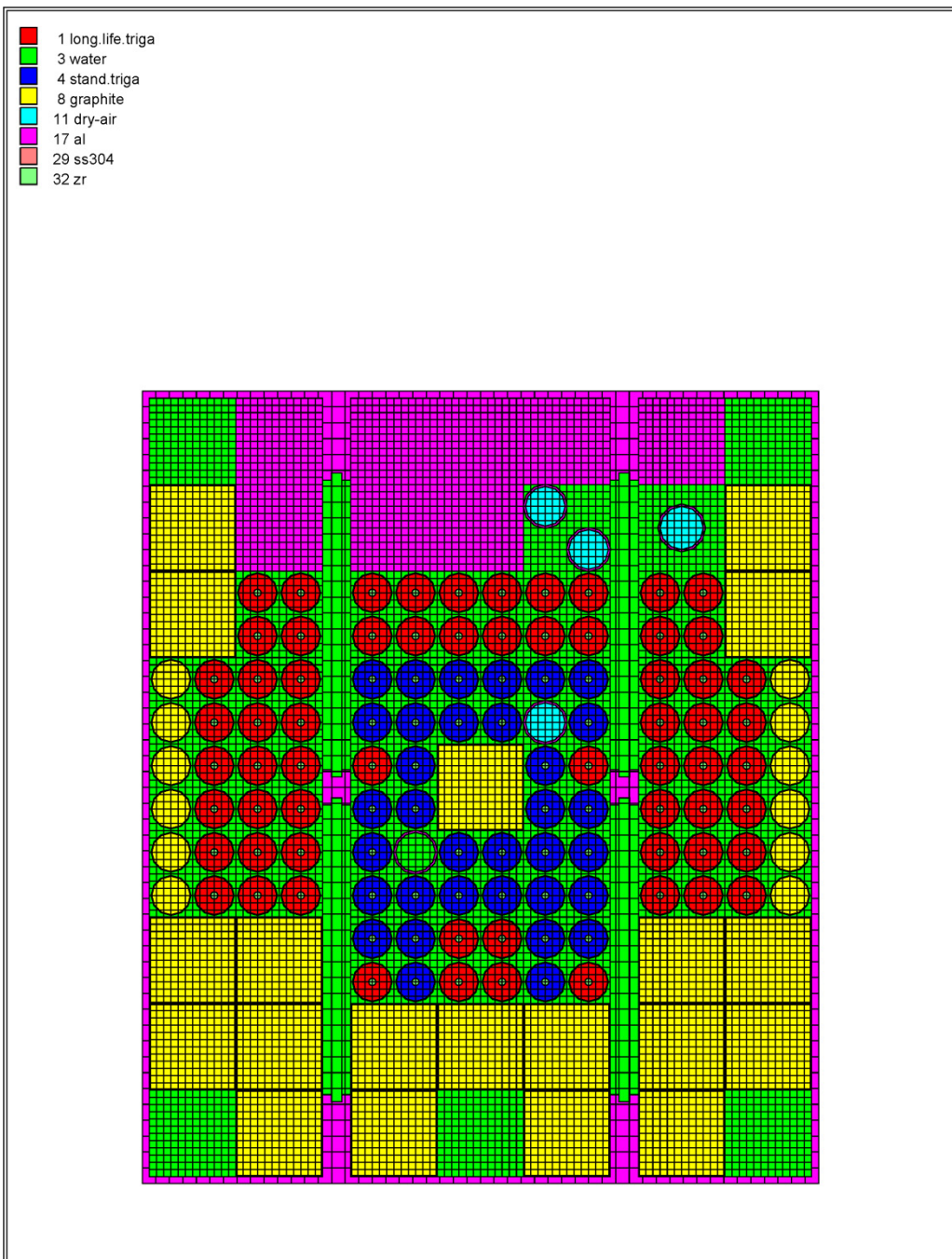


圖 6.3.3-1. 週期 1 的計算模型。

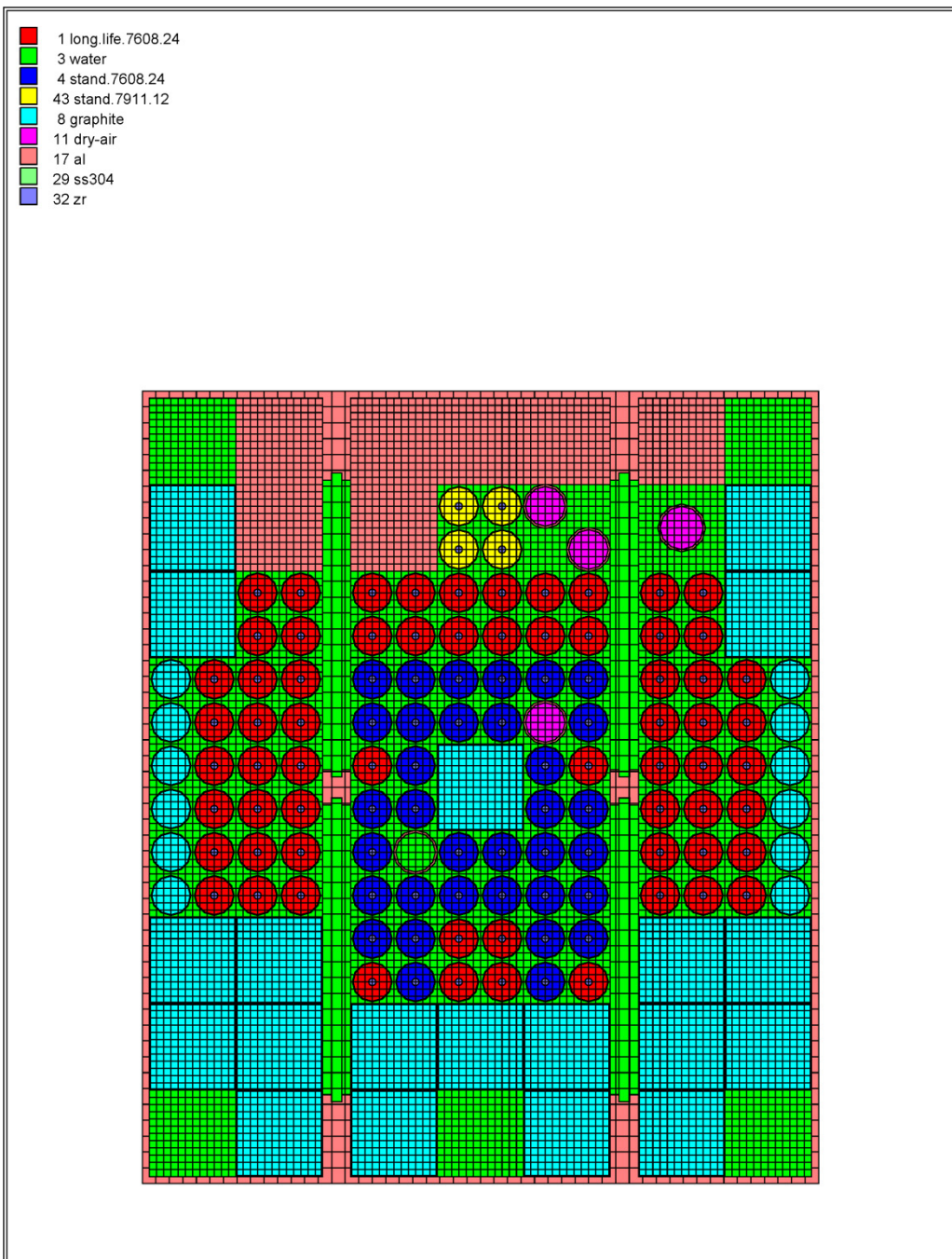


圖 6.3.3-2. 週期 2 的計算模型。

- 1 long.life.7608.24
- 14 long.life.8208.09
- 3 water
- 4 stand.7608.24
- 43 stand.7911.12
- 45 stand.8208.09
- 8 graphite
- 11 dry-air
- 17 al
- 29 ss304
- 32 zr

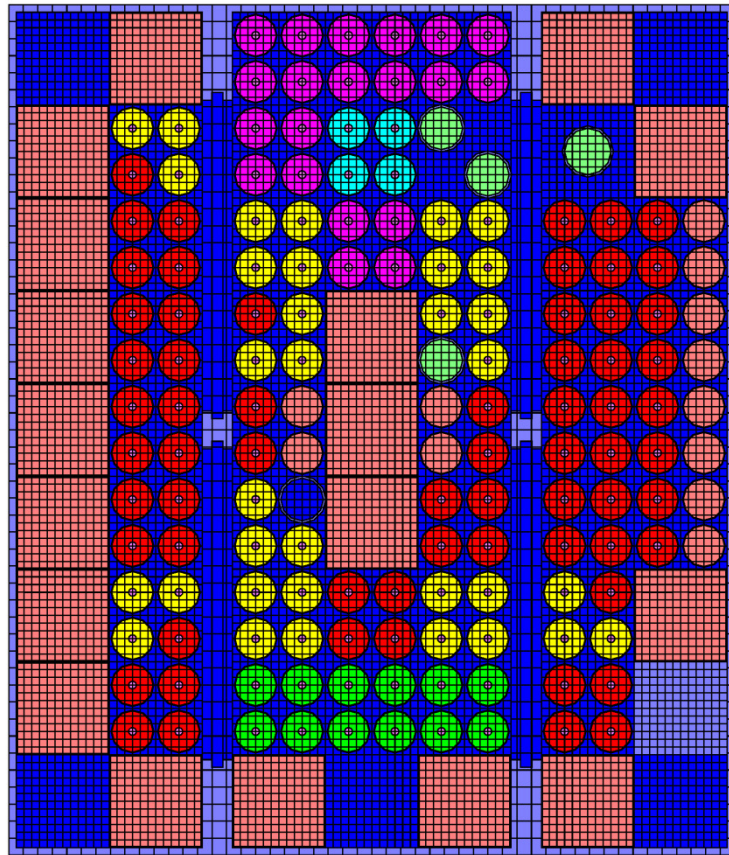


圖 6.3.3-3. 週期 3 的計算模型。

- 1 long.life.7608.24
- 14 long.life.8208.09
- 16 long.life.8510.18
- 3 water
- 4 stand.7608.24
- 43 stand.7911.12
- 45 stand.8208.09
- 47 stand.8510.18
- 8 graphite
- 11 dry-air
- 17 al
- 29 ss304
- 32 zr

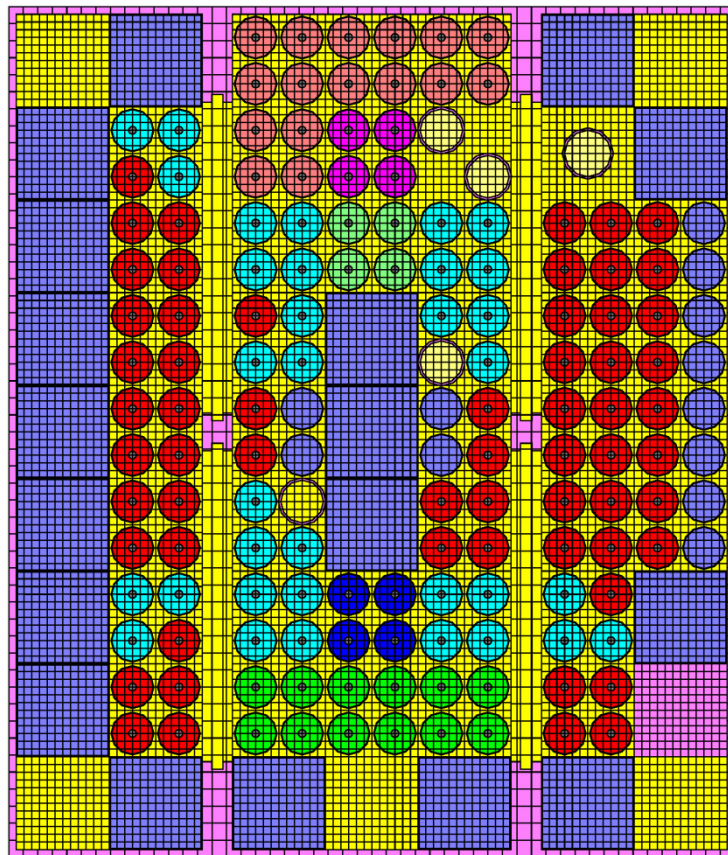


圖 6.3.3-4. 週期 4 的計算模型。

#### 6.4. 結論與建議

經由短半衰期分裂產物活度推導燃耗值與以燃耗計算程式 SCALE/TRITON 進行標準尺度計算，本研究建立了一套評估模式，來分析 TRIGA 用過燃料的燃耗值。研究中使用的測量方法可在欠缺燃料照射歷史的情形下推算出燃耗值，計算方法則根據 THOR 的運轉歷史進行燃耗計算，不同方法（測量與計算）的結果是很好的平行驗證。

未來 TRIGA 用過燃料燃耗的評估模式可以測量的結果為基準，以計算方式對所有的燃料進行長時間定期的燃耗追蹤與特定核種的含量。燃耗評估的結果不僅可隨時反應與掌握核設施的運轉狀況，亦可提供詳細可靠的資料予主管機關核子保防業務參考。

由於 THOR 爐心的幾何對稱性、材料多樣性、燃料使用與運轉方式多變性，THOR 屬於相對複雜的燃耗計算問題，因此確認評估模式中關鍵的爐心參數相當重要。未來可考慮以 THOR 爐心與 TRIGA 燃料實際可控制操作的方式，利用測量與計算方法，合理簡化 TRIGA 燃料燃耗評估模式的計算模型，並持續驗證評估模式的可靠度，以及提昇模式評估效率。或建立 THOR 包含爐房的完整模型，



以爐心燃料為射源項，評估工作環境與管制區域的輻射劑量率，利用已設置於現場之輻射監測設備的測量結果驗證燃耗評估模式的可靠度。在應用本研究於核能電廠上，雖然研究用反應器核心遠較核能電廠的小，但運轉模式卻遠較核能電廠複雜，因此本研究所建立起的計算模式，可原則性的應用於核能電廠。實驗部分，則可應用長半衰期方法，在燃料棒熱室中進行燃耗的量測與分析，惟電廠燃料元件由上百根燃料棒組成，應用時其複雜度也相對提升。

另外，詳細可靠的爐心燃料資訊可建立 THOR 照射管與射束出口的中子與加馬射線計算用的輻射源項，協助反應器實驗的進行，與應用推廣。

## 柒、參考文獻

1. T.K. Wang, D.C. Hsu, C.L. Tseng, “Feasibility Studies on Iterative Methods of Fuel Burnup Estimation using Gamma-ray Spectrometry,” *Applied Radiation and Isotopes*, Volume 41, No. 1 (1990), 41-47.
2. T.K. Wang, L.C. Shiao, C.L. Tseng, “Fuel Burnup Determination based on the Measurement of a Short-lived Fission Product,” *Nuclear Technology*, 91 (1990), 413-418.
3. J.J. Peir, T.K. Wang, C.C. Liu, “TRIGA Fuel Enrichment Verification based on the Measurement of Short-lived Fission Products,” *Applied Radiation and isotopes*, 50 (1999), 1085-1096.
4. J.J. Peir, C.C. Liu, “TRIGA fuel burnup evaluation by nondestructive gamma-ray spectrometry,” *Nuclear Science Journal*, **37** (2000), 91-107.
5. T.K. Wang, J.J. Peir, “An Iterative Approach for TRIGA Fuel Burnup Determination using Nondestructive Gamma-ray Spectrometry,” *Applied Radiation and Isotopes*, 52 (2000), 105-118.
6. R. Khan, S. Karimzadeh, H. Bock “TRIGA fuel burn-up calculations and its confirmation,” *Nuclear Engineering and Design*, 240 (2010), 1043–1049.

7. S. Karimzadeh; R. Khan; H. Boeck, "Gamma spectrometry inspection of TRIGA MARK II fuel using cesium isotopes," *Nuclear Engineering and Design*, 241(2011), 118-123.
8. M. Kost'al, M. Svadlenkova, J. Milcak, "The application and comparison of Zr-97 and Sr-92 in the absolute determination of the contribution of power density and cladding activation in a VVER-1000 Mock-Up on the LR-0 Research Reactor," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 738 (2014) 87-92.
9. M. Svadlenkova, L. Heraltova, V. Juricek, "Gamma spectrometry of short living fission products in fuel pins," *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment*, 739 (2014), 55-62.
10. U. Reus and W. Westmeier, "Catalog of gamma rays from radioactive decay," *Atomic Data and Nuclear Data Tables*. 29, (1983), 1.
11. M.B. Chadwick, P. Obložinský, M. Herman, N.M. Greene, R.D. McKnight, D.L. Smith, P.G. Young, R.E. MacFarlane, G.M. Hale, S.C. Frankle, A.C. Kahler, T. Kawano, R.C. Little, D.G. Madland, P. Moller, R.D. Mosteller, P.R. Page, P. Talou, H. Trellue, M.C. White, W.B. Wilson, R. Arcilla, C.L. Dunford, S.F.

Mughabghab, B. Pritychenko, D. Rochman, A.A. Sonzogni, C.R. Lubitz, T.H. Trumbull, J.P. Weinman, D.A. Brown, D.E. Cullen, D.P. Heinrichs, D.P. McNabb, H. Derrien, M.E. Dunn, N.M. Larson, L.C. Leal, A.D. Carlson, R.C. Block, J.B. Briggs, E.T. Cheng, H.C. Huria, M.L. Zerkle, K.S. Kozier, A. Courcelle, V. Pronyaev, S.C. van der Marck, “ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology Applications,” Nuclear Data Sheets, Nuclear Data Sheets, 107 (2006), 2931–3060.

12. S.F. Mughabghab, M. Divadeenam, N.E. Holden (Eds.), “Neutron Cross Sections,” Vol.1, Part A, Z=1-60, Academic Press, New York (1981).
13. S.F. Mughabghab (Ed.), “Neutron Cross Sections,” Vol.1, Part B, Z=61-100, Academic Press, New York (1984).