

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書
(出國類別：實習)

赴美國阿岡國家研究所實習報告

服務機關：行政院原子能委員會核能研究所

出國人 職 稱：助理研究員

姓 名：葉昭廷

出國地區：美國

出國期間：90年8月25日至90年10月21日

報告日期：90年12月17日

摘 要

本次實習主要任務為建立 WIMS-ANL/DIF3D/REBUS 程式集之 TRR-II 爐心計算模式，藉以進一步檢驗本所以 CASMO-4/CITATION 程式集所建立計算模式之準確性。

WIMS-ANL/DIF3D/REBUS 為多年來阿岡國家研究所 (ANL) 所使用之爐心計算程式，用來協助分析國際間各式各樣研究用反應器之工具，至今至少已服務超過 100 座反應器，其準確性為國際上所公認。

建立 TRR-II 爐心之 WIMS-ANL/DIF3D/REBUS 模式後，遂進行各種核參數之計算，包括過剩反應度 (Excess Reactivity)、停機餘裕 (Shutdown Margin)、尖峰功率因子 (Peaking Factor)、反應度係數 (Reactivity Coefficients) 以及動力學參數 (Kinetics Parameters) 等。與本所模式比對結果二者相當一致，顯示本所計算模式之準確性應無疑慮，且已達國際水平。

目 次

摘 要	(頁碼)
一、目 的	1
二、過 程	2
三、心 得	5
四、建 議	19
五、附 錄	20

一、目的

本次赴美國阿岡國家研究所實習，主要任務為建立 WIMS-ANL/DIF3D/REBUS 程式集之 TRR-II 爐心計算模式，藉以進一步檢驗本所以 CASMO-4/CITATION 程式集所建立計算模式之準確性。WIMS-ANL/DIF3D/REBUS 為多年來阿岡國家研究所 (ANL) 所使用之爐心計算程式，用來協助分析國際間各式各樣研究用反應器之工具，至今至少已服務超過 100 座反應器，其準確性為國際上所公認。

關鍵工作項目依程式性質分別包括如下：

1. WIMS-ANL 模式

- 根據 TRR-II 爐心特性，建立各種相關元件之中子截面資料庫，提供下游擴散理論 (Diffusion Theory) 程式 (如 DIF3D、CITATION 等) 使用。

2. DIF3D 模式

- 使用上述建立之元件資料庫，建立 TRR-II 爐心三維計算模式，藉以計算各種相關之爐心參數，例如過剩反應度 (Excess Reactivity)、停機餘裕 (Shutdown Margin, SDM)、反應度係數等。

3. REBUS 模式

- 利用本程式計算 TRR-II 爐心之燃耗分佈，包括平衡燃料週期 (Equilibrium Cycle) 搜尋及燃耗累積計算等。

二、過 程

職於九十年八月二十五日搭乘長榮 BR-028 班機，自桃園中正國際機場飛往美國舊金山市，再由舊金山轉機 (AA-1608) 到芝加哥 (Chicago) 市，於二十六日清晨抵達後便直接住進事先即已訂好之當地公寓。隔日即進入阿岡國家研究室 (ANL)，開始為期 56 天實習工作。至十月十九日結束所有工作，整理行李，於二十日搭乘美國航空 (AA-1593) 到舊金山，再轉搭乘長榮 BR-027 班機返國，其間實習日程 58 日，主要工作內容列於表一。

表一、葉員赴美實習主要工作內容

日期	工作內容
8 月 25 日	晚上 11:30 自中正機場出發，抵達舊金山市後，再轉機至芝加哥市，抵達當地時間已經隔天清晨 5 點半了。由我在 ANL 工作時之 Host - Dr. Jay-Liaw 接待。
8 月 27 日~28 日	● 依照 ANL 規定，實習超過一個月，至少須參加由人事部門辦理之新生訓練 (Orientation) 兩天，場地在 201 館人事部 (Human Resource Division)。
8 月 29 日~9 月 7 日	● 熟悉工作環境，並建立電腦帳號 (Linux)。與 Jim Matos 等 4 人開會討論工作項目。 ● 建立 WIMS-ANL 之 TRR2 爐心所使用之各種元件模式，包括：SFE、FFE、Side-Plate for SFE、Side-Plate for FFE、AL Core Channel、AL Guide

	<p>Tube、Test Section、Control Rod、H₂O Reflector、D₂O Reflector 等共 10 個。</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 修改部份元件之 micro cross section。針對爐心外圍燃料元件加入 D₂O spectrum 效應，以及靠近爐心之 D₂O 內圈使用 fission source 作為計算源取 micro xs，外圈則以 1/E 之 spectrum 作為計算源。
9 月 8 日~9 月 21 日	<ul style="list-style-type: none"> ● 完成 WIMS-ANL 之 TRR-II 爐心所使用之所有元件模式。 ● 建立 REBUS 之 TRR-II 爐心模式。 ● REBUS 模式使用 Micro xs，這些 xs 直接由上游 WIMS-ANL 計算。因此必須決定 REBUS 模式內所有區域之 Atom Density 才能進行計算。同時本模式必須詳細描述 TRR-II 爐心三維結構，模式建立階段極為費時。
9 月 22 日~10 月 5 日	<ul style="list-style-type: none"> ● 完成 REBUS 模式，並進行模式微調。 ● 進行平衡週期 SEARCH 計算(極為耗時)。 ● 平衡週期分析，並取出 BOEC、EOEC 之 ATOM DENSITIES 分佈 ● 進行平衡週期爐心參數計算，包括 Xenon Worth、Control Rod Worth、Shutdown Margin、Reactivity Change from BOEC to EOEC、Coefficients、Kinetics 等。

10月6日~10月19日	<ul style="list-style-type: none"> ● 持續平衡週期爐心參數計算與分析。 ● 整理資料向 RERTR JIM MATOS 先生簡報並討論計算結果。 ● 學習計算 KINETICS PARAMETERS 之新方法，此方法名稱為 1/v Insertion Method，為 ANL 資深工程師開發，是一簡單又快速且不須計算 ADJOINT FLUX 分佈的好方法。 ● 整理行囊，賦歸。
10月20日~10月21日	<ul style="list-style-type: none"> ● 整理行囊，賦歸。

三、心得

在 ANL 期間，幾乎所有時間都花在建立 TRR-II 爐心計算模式上面，模式建立完成後，緊接著計算各種爐心參數，茲將 TRR-II 模式做一扼要介紹。

(一) ANL 計算方法介紹

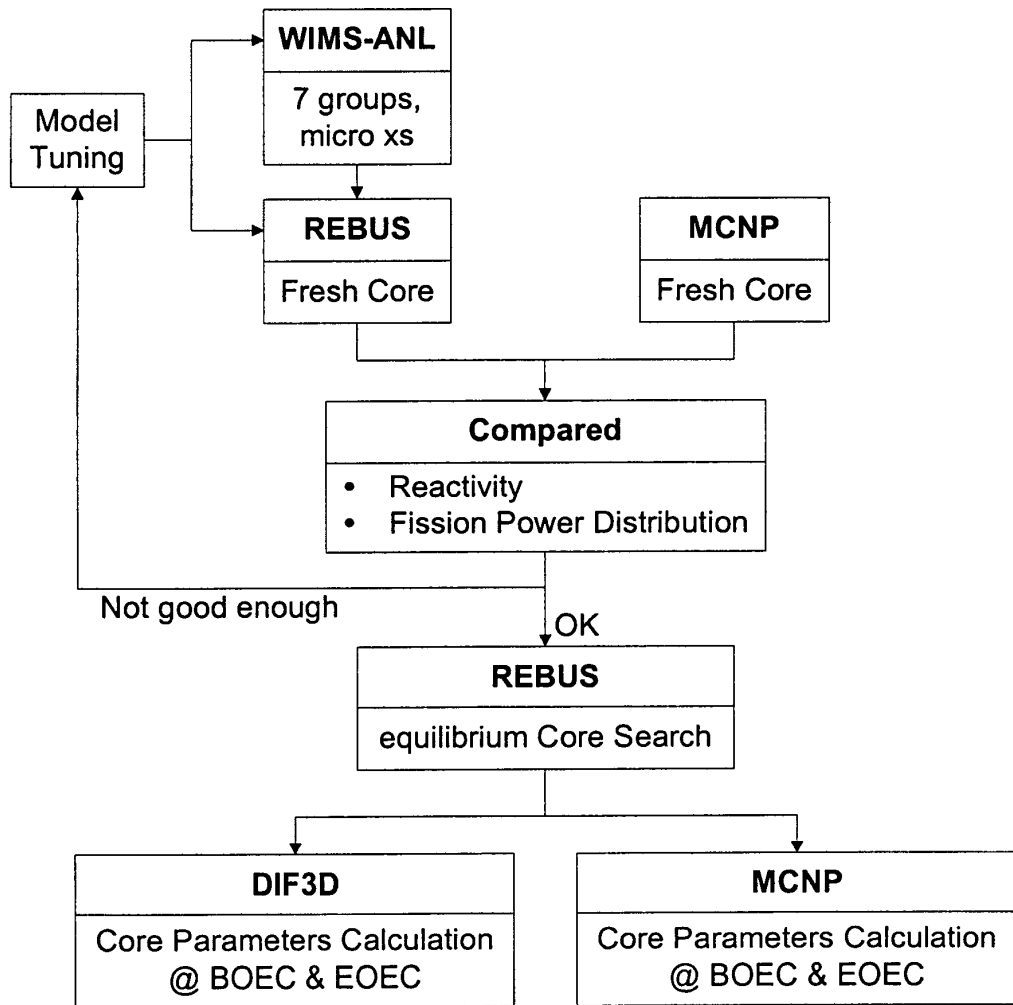
ANL 用以計算反應器爐心中子核參數之程式主要有 MCNP-4B、WIMS-ANL v4.04、及 REBUS v1.1。

MCNP-4B 為一蒙特卡羅方法之程式，使用之中子截面資料庫為 ENDF/B-VI，為目前版本最新之資料庫。本程式特色為模擬物件幾何幾乎不需任何近似，且使用之中子資料庫能譜連續，為國際間公認最準確之計算工具，但其缺點為如須降低統計誤差，則必須增加樣品（中子）數目，計算時間極為耗時，因此不適合用來作為主要計算工具，本程式主要用以檢驗 WIMS-ANL/REBUS 之計算結果。

WIMS-ANL v4.04 為 ANL 工程師根據 WIMS-D4 版本改寫成為現今之版本。其所使用之截面資料庫為 ENDF/B-VI，中子能群有 69 群及 172 群兩種。本程式為一 1D 遷移理論程式，其主要功能為產生較少數群之微觀（Micro）或巨觀（Macro）截面資料，提供下游擴散理論程式（例如 DIF3D 或 CITATION）使用。

REBUS v1.1 為一燃耗計算程式，內含之中子通率計算核心為 DIF3D，本程式可以進行平衡燃料週期搜尋及燃耗累積計算，也可以單獨進行只有一次 DIF3D 計算，用以計算不同狀況之爐心參數。

圖一為 ANL 計算各型反應器爐心之標準流程。此次 TRR-II 爐心參數計算也以此程序進行。圖中所示右邊之 MCNP 分支主要作為檢驗左邊 WIMS-ANL/REBUS 模式之準確性。

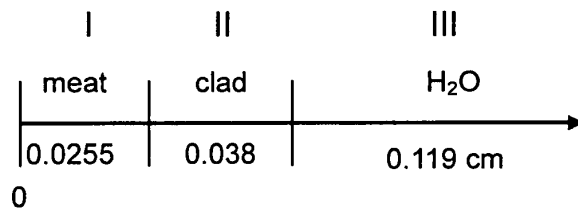


圖一、ANL 計算各型反應器之標準流程

(二) WIMS-ANL 模式

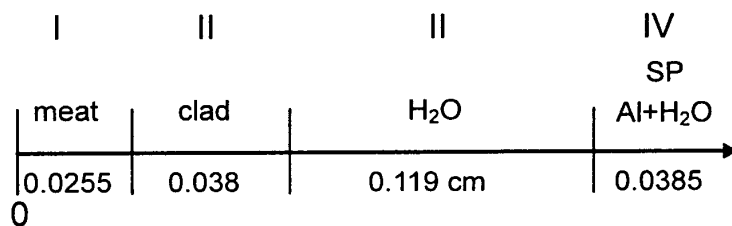
WIMS-ANL 為一 1D 程式，最多只能輸入 4 個線性範圍 (Region)，然後以 "Reflective" 作為計算邊界條件 (Boundary

Condition)，達到無限延伸目的。標準之片狀形式(Plate Type)之燃料元件模擬方式如圖二所示，圖中尺寸係依 TRR-II 標準燃料元件 (Standard Fuel Element, SFE) 規格標示，燃料蕊 (Meat) 與冷卻水 (Coolant) 部分取半厚度，即單一 Cell。



圖二、TRR-II 標準燃料元件之 WIMS-ANL 三區模式

圖三為以 4 區模式模擬標準燃料元件內之鋁製邊板 (Side-Plate)，前三區為標準燃料元件，第四區即為所欲模擬之邊板，其範圍乃根據其與燃料之體積比例計算得到。整個模式計算後取第 4 區之截面資料即可。



圖三、TRR-II 標準燃料元件內邊板之 WIMS-ANL 四區模式

根據 TRR-II 爐心特性，至少須建立 12 種元件 (如表二所列) 之截面數據才能完整描述整個爐心 (包含重水及最外圍輕水區域)。

表二、TRR-II 之 WIMS-ANL 模式

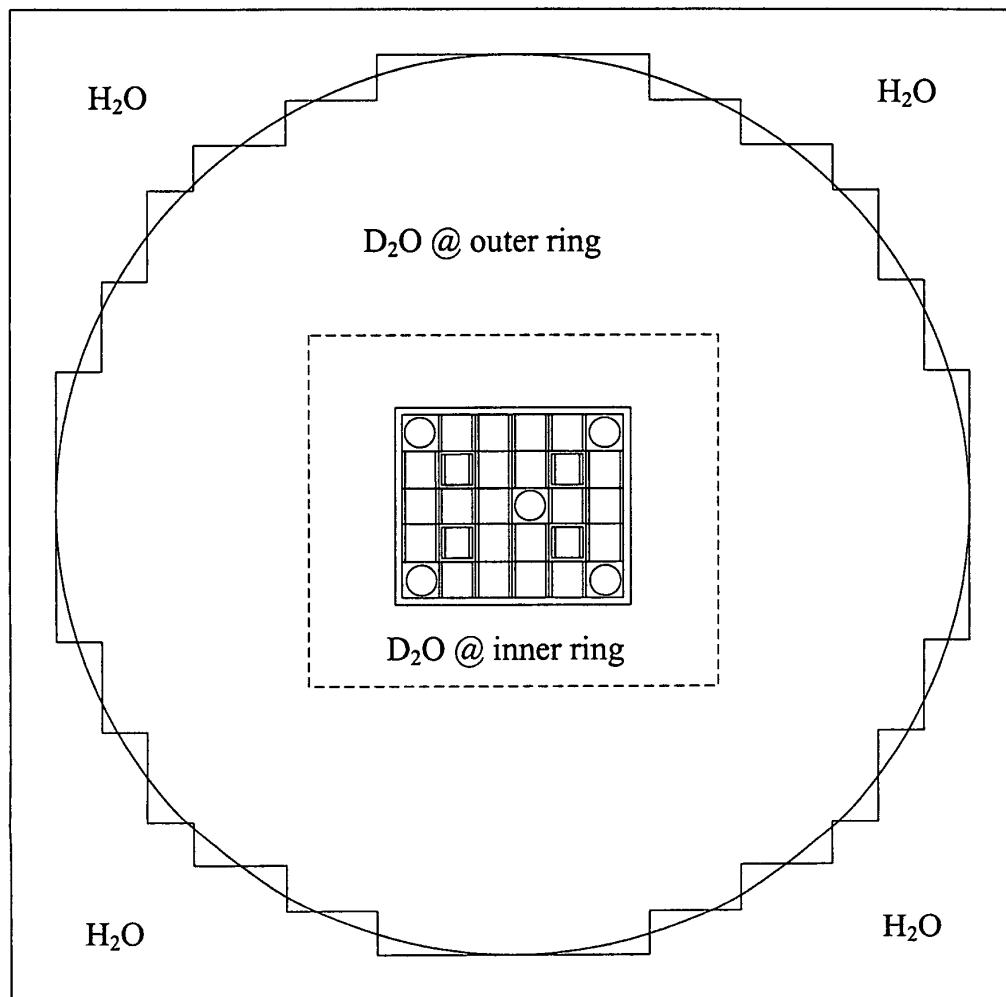
編號	元件名稱	模擬方式
Cell-A	SFE	3 regions
Cell-B	FFE	3 regions
Cell-C	Side-Plate for SFE	4 regions
Cell-D	Side-Plate for FFE	4 regions
Cell-E	H ₂ O Reflector	Point model with 1/v spectrum
Cell-F	D ₂ O Reflector @ outer ring	Point model with 1/v spectrum
Cell-G	Guide Tube of FFE and CR	Point model
Cell-H	Test Section	4 regions
Cell-J	Control Rod	4 regions
Cell-K	Core Channel	Point model
Cell-L	Coolant (H ₂ O)	Point with fission spectrum
Cell-M	D ₂ O Reflector @ inner ring	Point with fission spectrum

(三) REBUS 模式

前面已經簡略介紹了 REBUS 程式的主要功能為燃耗計算。但首先必須將 TRR-II 爐心三維幾何完整輸入，本模式將爐心分成若干區 (Zone)，例如輕水反射體、外環重水反射體、內環重水反射體、爐心通道、爐心內冷卻水、標準燃料元件、隨動燃料元件、爐心內照射孔、控制棒等區域，由於幾何輸入方式採取重疊位置後面取代前面，因此本模式由最外圍輕水區先定義，在逐次向內定義各區域，最後再根據各區域之大小與可能之中子通率變化情形細分計算節點 (Mesh)。圖四所示為本模式之徑向輸入幾何區域情形，軸向則上下各 30 公分各切成 6 節點，中間 180 公分平均切成 72 節點，因此軸向總結點共 84 個，大抵而言已經非常精細了。

除了幾何輸入較為複雜外，控制棒之處理也是 ANL 方法很重要的一環，因為用有限差分 (Finite Difference) 方法解

擴散理論之程式在遇到有非常強吸收區域時，其準確性會較差，因此 ANL 工程師也在 REBUS 模式內放入一個叫內部邊界條件 (Internal Boundary Condition)，作為解決控制棒算不準的困擾。



圖四、TRR-II 之 REBUS 徑向輸入模式

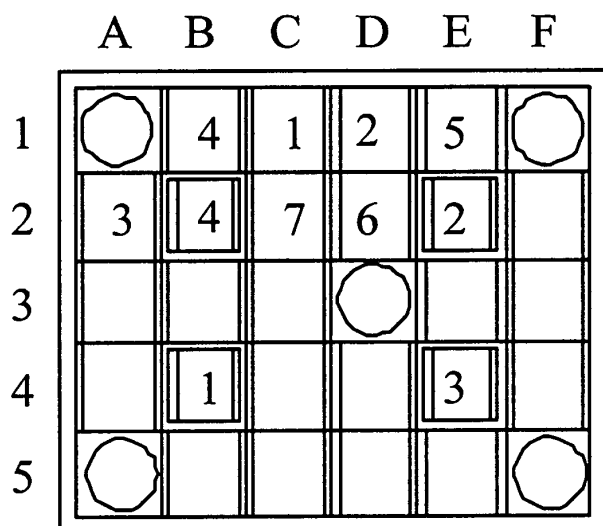
模式中之另一重要課題為設定平衡燃料週期準則。根據 TRR-II 原先燃料循環設計，平衡週期時每根燃料經歷 7 個週期才會退出爐心，而且每根新燃料進入爐心後都有一定之裝

填路徑。由於平衡週期後，每週期填換燃料根數為 3 根，因此在 REBUS 模式內必須定義每根燃料從第一週期到最後週期之路徑，總共必須定義 3 個路徑才能符合現今燃料循環設計。下列為模式中所定義之三個路徑，路徑中之座標參考圖五所示。

Path1: C1-->D1-->A2-->B1-->E1-->D2-->C2

Path2: C5-->D5-->A4-->B5-->E5-->D4-->C4

Path3: F3-->A3-->F4-->F2-->E3-->B3-->C3



圖五、TRR-II 燃料路徑與座標

(四) ANL 模式特色

以上討論為以 ANL 工具建立 TRR-II 爐心計算模式之扼要說明，其中較具特色且值得本所建立模式時之參考項目如下：

- 引用內部邊界條件作為修正控制棒計算模式，藉由

MCNP 計算之 J/ϕ 數據，置入 DIF3D 之控制棒模式中，使得 DIF3D 計算之反應度與分裂功率分佈較接近 MCNP 計算結果。

- 由於爐心最外圍（與重水緊鄰燃料共 11 根）之燃料受到重水很強之能譜效應，ANL 將這些燃料之微觀截面加以另外處理，即以 WIMS-ANL 之 SFE 模式加入第 4 區放置重水，以模擬其效應，再重新取前 3 區之截面，作為這些燃料之計算截面。內部區域（總共有 7 根）燃料則仍然採用標準 3 區模式。
- 將重水分成內外兩環形區域，內環靠近爐心區域，其截面使用分裂能譜（Fission Spectrum）數據庫，而較外圍區域則使用 $1/v$ 能譜數據庫。根據 ANL 經驗，如全部使用分裂能譜數據庫（目前本所模式），其誤差約為 4 mk 左右。

（五） 模式計算結果與比較

- 全新燃料時，反應度與分裂功率分佈比較

圖六所示為控制棒全出，REBUS 計算結果與 MCNP 比較情形，圖中數據說明二者反應度幾乎一致（誤差低於 1 mk），而且分裂功率分佈比較結果二者誤差更都在 1% 以內，顯示在控制棒全出之狀況下，REBUS 模式有很準確之計算結果。

圖七所示為控制棒全入，REBUS 計算結果與 MCNP 比較情形，圖中數據說明二者反應度誤差約為 18 mk，此誤差

相對於國際間控制棒全部本領相比較仍可接受（國際上誤差大約為 20 mk 左右）。分裂功率分佈比較除了兩控制棒間位置之標準燃料元件稍大（約為 4.4%）外，其餘誤差更都在 2% 以內，由於控制棒插入後位於兩控制棒間之燃料能譜轉移（Shift）厲害而有較大誤差，如果在截面計算階段給予能譜適當修正，必能將此誤差減低，但考量此情形之燃料僅有兩根，時效限制，以及控制棒全插入之運轉狀況幾乎不存在等因素，於是仍採用目前模式而未進行任何變動。在控制棒全入之狀況下，REBUS 模式上整體之準確性仍令人滿意。

● 燃耗比較

為證實本模式燃耗計算之適用性，REBUS 模式分別以 MCNP 程式和 DIF3D 程式作為中子通率計算核心，進行燃耗計算，各自計算至 240 天，比較燃耗計算過程二者之反應度誤差情形。圖八所示為其反應度比較結果，圖中顯示二者在燃耗計算過程之誤差（Bias）並不會擴大，而且幾乎固定在約 0.341%，若將此固定誤差扣掉，則情形如圖九所示，圖中二者幾乎重疊在一起，說明 REBUS 內之 DIF3D 中子計算核心之準確性當無疑慮。

確認 REBUS 模式之中子核心程式可靠度後，即進行平衡週期搜尋計算，此部分計算所需要之 CPU 時間極為吃重，將所有必要條件定義完成後，利用下班後夜間時間進行計算，以免影響其他同仁使用 CPU 之不便。圖十為本模式計算完成後之平衡週期初始燃耗分佈與本所模式以手動方式找出之燃耗分佈比較結果，數據顯示二者大致吻合，最大誤差約

為 2.2%，且該燃耗值已經到了快要退出爐心之階段。

- TRR-II 平衡週期爐心參數比較

比較項目包括平衡週期初始及末端之過剩反應度、不同位置之控制棒本領、不同狀況下反應度改變量、以及動力學參數等。表三為以上各參數計算結果比較，數據顯示大部分參數計算結果二者頗為吻合，唯氙毒物本領與動力學參數兩項誤差較大，前者主要來自上游截面程式（即 WIMS-ANL、CASMO-4）之能譜差異以及對氙毒物原子密度計算結果不同所致，此部分差異有待進一步研究分析。後者誤差來源可能為二者計算此參數時所使用之能群數目不同所致，CITATION 程式計算 Adjoint Flux 及 Normal Flux 分佈時所使用之能群數目僅有 3 個，而 VARI3D 程式則為 7 個，一般而言，後者有較佳之準確性，而且以 MCNP 程式計算延遲中子比例（Delayed Neutron Fraction）時也證實 VARI3D 結果較為接近，CITATION 這部分之誤差仍有待進一步探討。



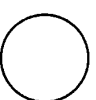
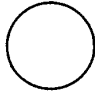
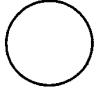
表三、TRR-II 平衡週期爐心參數比較

Items	Parameters	Citation	Rebus ANL Bu	MCNP INER Bu	MCNP ANL Bu
Excess Reactivity	Keff (ARO)				
	● BOEC, Xenon Free	1.1420	1.1475	1.1401	1.1441
	● BOEC, Xenon Eq.	1.1073	1.1045		
	● EOEC, Xenon Eq.	1.0670	1.0705	1.0587	1.0664
CR Worth	Keff @ Different CR Positions (BOEC, Xenon Free)				
	● ARO	1.1420	1.1475	1.1401	1.1441
	● ARI	0.9062	0.8946	0.9039	0.9077
	● CR #3 Out, Others In	0.9878	0.9851	0.9886	0.9929
	● All CRs Bank to 33.5 cm	1.0254	1.0319		1.0382
Changes of Reactivity (mk)	● Depletion from BOC to EOC	40.3	42.0		
	● Temperature Swing from Cold to Hot	4.0	3.3		
	● Xenon Swing from Cold to Hot	34.6	42.6		
Kinetics	BOC, Cold		VARI3D		
	● Delayed Neutron Fraction	6.7e-3	7.1e-3		7.0e-3 ± 1.33e-4
	● Prompt Neutron Lifetime	1.2e-4	8.8e-5		

Fission Power Distribution

Keff = 1.25102

MCNP Keff = 1.25064 +- 0.00008

	4.213	4.390	4.346	4.114		
	4.228	4.411	4.368	4.127		
	1.004	1.005	1.005	1.003		
4.030	2.692	4.531	4.523	2.613	3.886	
4.052	2.698	4.502	4.493	2.609	3.903	
1.005	1.002	0.994	0.993	0.998	1.004	
4.012	4.411	4.760		4.300	3.848	MCNP REBUS R/M
4.025	4.377	4.702		4.255	3.859	
1.003	0.992	0.988		0.990	1.003	
4.025	2.694	4.527	4.523	2.616	3.889	
4.052	2.698	4.502	4.493	2.609	3.903	
1.007	1.002	0.994	0.993	0.997	1.004	
	4.203	4.370	4.349	4.116		
	4.228	4.411	4.368	4.127		
	1.006	1.009	1.004	1.003		

CASE3: Outside SFE use micro xs with the effect of D2O spectrum

Input: /home/guest1/rebus/fre_neq_aro-3.inp

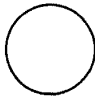
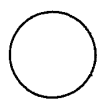
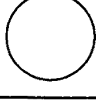
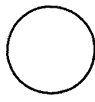
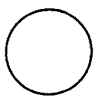
Output: /home/guest1/rebus/fre_neq_aro-3.u

圖六、控制棒全出，REBUS 計算結果與 MCNP 比較

Fission Power Distribution ARI

Keff = 0.98142

MCNP Keff = 0.99901 +- 0.00018

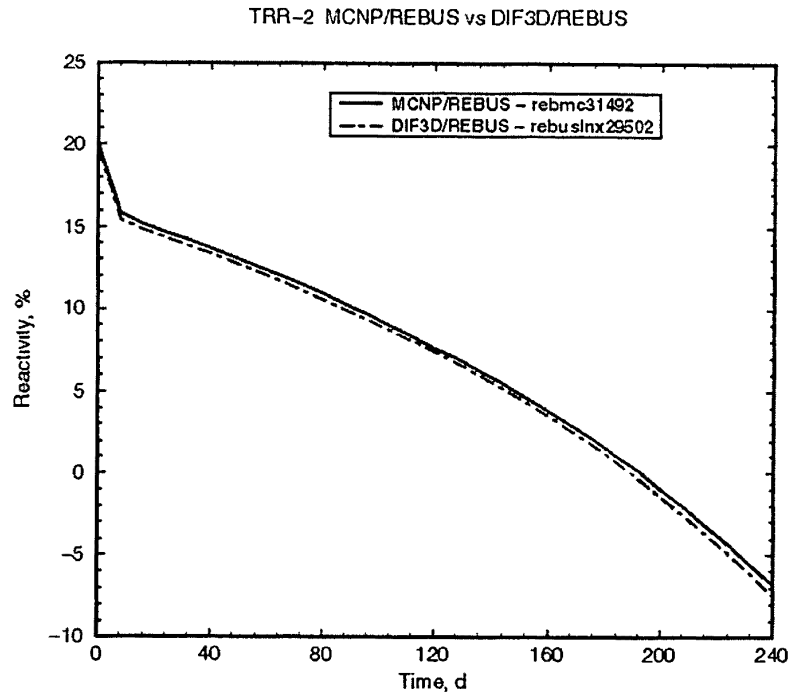
	4.704	5.842	5.793	4.601		MCNP REBUS R/M
	4.714	5.932	5.887	4.627		
	1.002	1.015	1.016	1.006		
4.094	0.436	4.989	4.955	0.415	3.931	
4.105	0.431	4.950	4.895	0.418	3.965	
1.003	0.988	0.992	0.988	1.008	1.009	
4.239	3.529	5.238		3.461	4.062	
4.247	3.374	5.145		3.312	4.074	
1.002	0.956	0.982		0.957	1.003	
4.084	0.434	4.979	4.957	0.418	3.931	
4.105	0.431	4.950	4.895	0.418	3.965	
1.005	0.992	0.994	0.987	1.001	1.009	
	4.682	5.826	5.803	4.600		
	4.714	5.932	5.887	4.627		
	1.007	1.018	1.014	1.006		

CASE-3: Apply the D2O spectrum effect to SFE @Boundary

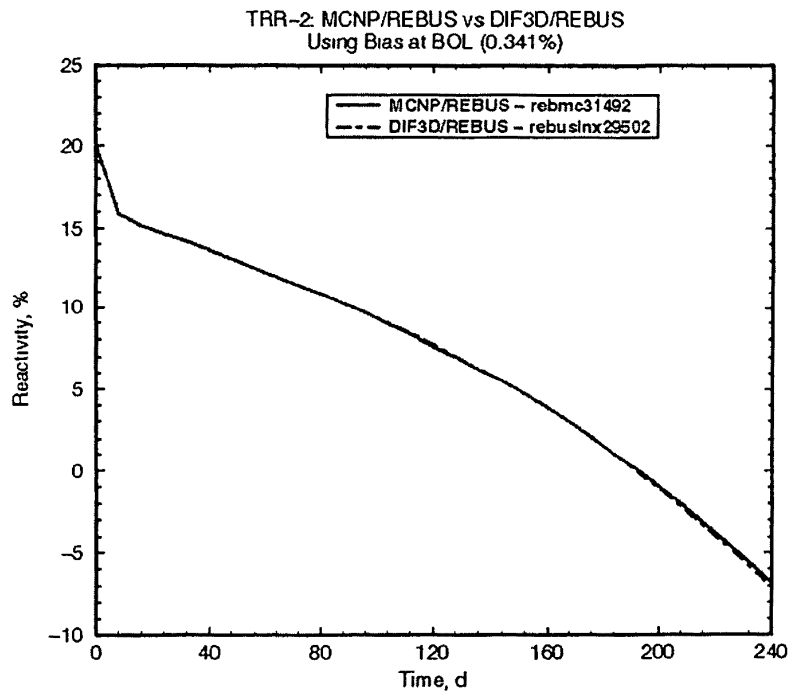
Input: /home/guest1/rebus/fre_neq_ari-3.inp

Output: /home/guest1/rebus/fre_neq_ari-3.u

圖七、控制棒全入，REBUS 計算結果與 MCNP 比較



圖八、REBUS 模式內不同中子計算核心反應度比較結果



圖九、不同中子計算核心反應度扣除偏差後比較結果

BOEC Assembly Fissile Loadings (g of U-235)

	A	B	C	D	E	F
1		317.98	429.51	388.67	285.60	
		321.19	429.51	390.00	289.82	
		1.01	0.00	0.34	1.48	
2	356.69	193.80	227.42	255.21	237.82	325.85
	353.30	192.60	231.07	260.89	236.68	327.71
	-0.95	-0.62	1.60	2.23	-0.48	0.57
3	392.93	265.87	239.97		293.98	429.51
	393.91	266.58	237.17		297.75	429.51
	0.25	0.27	-1.17		1.28	0.00
4	350.19	261.86	226.47	254.63	215.45	359.21
	352.54	261.86	229.67	259.54	213.93	359.58
	0.67	0.00	1.41	1.93	-0.71	0.10
5		317.33	429.51	388.51	285.00	
		320.25	429.51	389.51	288.57	
		0.92	0.00	0.26	1.25	

CITATION
REBUS
$(Re-C_i)/C_i$ <-- Difference in %

圖十、TRR-II 平衡週期初始燃耗分佈比較

四、建 議

本次赴美實習，順利完成建立所有 ANL 使用程式之計算模式，且規劃中之所有爐心參數也全部完成計算，並且與本所模式比較，證實本所模式之適用性，可說圓滿達成此次實習的任務。最後，提出一點建議事項以供本所參考：

1. 在 ANL 工作時，發現 MCNP 仍為其重要之驗證工具或計算主力程式，但解決計算效能方能使此程式發揮功能。ANL 工程師利用平行運算方式 (Parallel Virtue Machine, PVM) 解決此一難題。現在 ANL 利用 23 台個人電腦 (全部為 Pentium IV, SCSI 介面等級) 以 Linux 作業平台串接成 Cluster-Client 形式進行 PVM 運作，他們已經完全放棄昂貴之 SUN-Workstation 了，有了十幾部 CPU 同時運算 MCNP 之 Case 後，本來一部工作站需運算 3 天以上時間，馬上就能在短短兩三小時內完成，效能上之提升立現。如果本所將來評估繼續使用 MCNP 程式作為計算工具且有效能上之需求時，建議應購置多部高階個人電腦以建立 PVM 計算平台。職在 ANL 期間已經學會建立該項技術，而且也在爐心分組系統上測試成功，運用上已無任何疑慮。

五、附 錄

此行赴美實習執行任務過程，所收集到之資料（存於核研所核工組爐心分組葉昭廷處）整理如下：

1. J. R. Deen, W. L. Woodruff, “WIMS-ANL User Manual REV. 4”, Argonne National Laboratory, ANL/RERTR/TM-23, Jan. 2001.
2. “REBUS User Manual”, Argonne National Laboratory, Jan. 2001.
3. Arne P. Olson, “Status of REBUS Fuel Management Software Development for RERTR Applications”, Argonne National Laboratory, Presented at the 2000 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, Las Vegas, Nevada, Oct. 1-6, 2000.
4. M. M. Bretscher, “Perturbation-Independent Methods for Calculating Research Reactor Kinetic Parameters”, RERTR Program, ANL, ANL/RERTR/TM-30, Dec. 1997.
5. M. M. Bretscher, “Blackness Coefficients, Effective Diffusion Parameters, and Control Rod Worths for Thermal Reactors”, RERTR Program, ANL, ANL/RERTR/TM-5, Sep. 1984.
6. M. M. Bretscher, “Computing Control Rod Worths in Thermal Research Reactors”, RERTR Program, ANL, ANL/RERTR/TM-29, Feb. 1997.
7. Yuan Luzheng, Kang Yalun, “Problems Concerned in Fuel Design of CARR”, China Institute of Atomic Energy, Oct.

1998.

8. R. B. Pond, N. A. Hanan and J. E. Matos, "A Neutronic Feasibility Study for LEU Conversion of The Budapest Research Reactor", ANL, Oct. 1998.