

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

FRAPCON-3 程式燃料行為分析驗證
Verification of FRAPCON-3 by Case Study

計畫編號：1012001INER002

受委託機關(構)：台灣科技大學

計畫主持人：趙振綱

聯絡電話：(02)27376465

E-mail address：ckchao@mail.ntust.edu.tw

核研所連絡人員：曾哲聰

報告日期：101 年 11 月 30 日

目錄

中文摘要	3
ABSTRACT.....	4
作者及所屬單位	5
壹、 計畫緣起與目的	6
貳、 研究方法與過程	7
一、 研究方法	7
二、 研究過程	8
參、 主要發現與結論	12
一、 主要發現	12
二、 結論	12
肆、 參考文獻	24

中文摘要

國內商用核反應器燃料設計分析，相關準則基本上是依循美國核能管制委員會(US Nuclear Regulatory Committee, NRC)發行之文件 Standard Review Plan。而設計是否符合準則要求，有一大部分必須依賴程式模擬分析，因此燃料爐心行為分析程式成為核電主管機關、核燃料業者、電力公司以及研究單位共通的需求。FRAPCON-3 程式屬於美國核管會多年來 FRAPCON 系列的核燃料設計審查分析工具，第 3 版為最新版本，美國國家實驗室 Pacific Northwest National Laboratory (PNNL)受 NRC 委託負責開發與維護。

本研究安裝並測試該程式，除進行基本範例之運跑結果比對，也測試程式對核燃料爐心行為的分析能力，經由燃料運轉歷史功率之模擬來了解程式特性。主要分析結果以溫度分佈、分裂氣體釋出、燃料棒內壓、護套氧化層增長、護套變形與應力分佈為主。之後則以破損燃料為分析對象，以比較該程式對於破損肇因分析的能力。

Abstract

The domestic evaluation of nuclear power plant fuel designs usually follows the Standard Review Plan issued by US Nuclear Regulatory Committee (NRC). Fuel performance analysis is essential to assure that thermal and mechanical design criteria are met. Therefore, fuel behavior analysis code is common and developed in the authority, fuel vendors, utility and research laboratory. FRAPCON-3 code is the latest version of FRAPCON series applied by NRC for licensing review. It's developed and maintained by Pacific Northwest National Laboratory (PNNL).

Code installation and verification will be our first approach. We will focus on those analyses such as temperature distribution, fission gas release, rod internal pressure, cladding oxidation, cladding deformation and stress. A failure rod simulation will be included as a case study to understand the capability of root cause analysis.

作者及所屬單位

作者：

趙振綱

胡宗良

所屬單位：

台灣科技大學機械工程研究所

壹、計畫緣起與目的

核能研究所為建立核燃料行為分析能力，以協助提升國內核燃料運轉績效，過去即已引進過 FRAPCON-2 程式但已久未更新版本，近年則先引進 FEMAXI-6。兩者皆為核燃料爐心行為分析程式，前者為美國 NRC 所採用，後者則為 OECD 國家廣為使用。NRC 過去數年大力支持 FRAPCON 升級，並釋出第 3 版，核能研究所獲得 NRC 同意之後也引進該程式。因為 FRAPCON-3 程式源自核能管制單位，廣泛應用於申請審查，為延續國內之核燃料行為評估能力，有必要建立使用與分析技術。

本計畫從事該程式之安裝、運跑與測試，並參考破損案例，進行程式模擬分析；除可以驗證該程式之分析能力，亦可與其他程式之分析結果做比對，精進國內核燃料行為分析技術，以確保核電廠燃料營運績效。考量學界專業分工與人才培育，因此委由國內學術單位執行。

貳、 研究方法與過程

一、 研究方法

本計畫主使用美國能源部所屬國家實驗室 PNNL 所開發之燃料行為分析程式 FRAPCON-3.4a 來模擬燃料於爐心中的行為。燃料棒於爐心的運轉其行為變化將與燃料功率與溫度有極密切的關係，在進行燃料熱機設計安全評估時，為取得較大保守度，若以燃料棒內壓為考量時，將給與燃料丸最大外徑與護套最小內徑，因其內部空間最小，使得燃料丸與護套間受到最大內壓效果。因此分析時參數的給定與待分析項目之間的關係必須非常注意其合理性。

工作首先於一般個人電腦安裝該軟體，其程式界面如圖一至圖五所示，於微軟作業系統下檢視版本的相容性。其中包含了 Input, Power History, Axial Power Profile, Coolant Conditions, FRAPCON-3 Input 等五個分頁，並於各分頁中進行前處理，輸入分析時必須依照燃料之設計參數與所處之運轉環境值。在前面四個分頁數值輸入完畢後，程式可於最後的 FRAPCON-3 Input 分頁中自動產生程式 Input 檔案。

將建立完成的 Input 檔案於執行程式(FRAPCON-3.4a.exe)時輸入檔案名稱即可開始分析，其分析架構如圖六所示。分析結束後程式將產生 output 檔案，使用者可以使用微軟 Notepad 程式開啟，由運跑結果觀察燃料於爐心中不同運轉條件下的行為變化。該程式中也內含畫圖程式(aplotter.exe)，可以進行 output 檔案之圖形輸出後處理，提供應力、應變、內部壓力、分裂氣體釋等項目，如圖七所示。其中，燃料棒護套的受應力狀態常是用來判斷燃料破損的時機的重要指標，也是我們最常關注的項目之一。

核燃料爐心行為分析時，程式材料性質與各個行為模式的選

擇，對分析結果皆有不同程度的影響，因此在輸入數據時必須謹慎選擇。當使用者尚未建立充分的經驗，對燃料行為的演變也未具備完整的了解時，使用手冊中之內建值通常是對新上手者的建議做法。

程式運跑測試先以範例個案進行，本計畫我們採用文件所提供的 IFA432 Rod1 程式碼來進行測試如圖八，燃料設計參數與其運轉功率歷史、軸向功率分佈參數可見表一、圖九、圖十，冷卻系統環境可見表二。設定完後比較其 centerline temperature 結果可見圖十一，確定程式可以產生正確的結果後，最後則進行國內核電廠之破損案例分析，了解是否分析結果是否能預判破損之歷程。

二、 研究過程

完成程式安裝、運跑、與輸出比對等基本驗證工作之後，我們運用核電廠的破損案例作進一步的研究。本報告選取沸水式核電廠 10x10 破損燃料棒作為分析對象，該案例護套發生異常高應力的時間點與電廠運轉發現破損紀錄相近，而護套高應力軸向對應區域破損與破損位置也相當吻合。選用該組數據可以了解 FRAPCON 程式的能力，也希望對不同程式做初步的比較。

分析案例之運轉紀錄概述如下：

核電運轉 18 週期，滿載運轉約 1 週之後發現分裂氣體釋出，經確認發生燃料破損之後初停爐進行燃料更換，隨後安排破損燃料之檢驗、分析以及肇因分析。該廠於 17 週期曾經進行週期間爐心燃料啜吸(Sipping)檢驗，新發現燃料棒之破損時機初步認定是發生於 18 週期。雖然燃料廠家仍未排除該燃料之初始破損(Primary Failure)可能發生於 17 週期，但依據電廠之運轉監測數據，活度明顯增高的確發生於 18 週期。

對燃料行為分析程式而言，也許功能相近，但是各個程式的發展各有其背景，有些運用有限元素分析方法，有些則無。即使是採用有限元素分析，元素的類型與數量限制也有所差異。此外，核燃料及護套各個材料性質、行為模式、機制模擬等，亦有所差異。以下是分析過程的描述。

1. 燃料設計參數輸入(Input File)

相同的燃料設計經歷了不同的功率歷史，爐心行為自然也不大不相同，因此在進行分析時，所需要輸入的參數必須盡可能詳實。其中包含了燃料棒內外徑、燃料丸外徑、燃料棒長度含燃料有效長度(Active Length)、氣室長度(Plenum Length)、氣室彈簧設計、燃料棒預先填充的氬氣壓力等，均為重要的機械設計參數。由於氣室長度、內部容納氣體體積與氬氣壓力將直接影響燃料棒內部壓力，分析時必須確認再三。燃料外觀幾何尺寸、同位素性質、材料性質等參數，有時必須依據分析需求作細部調整，輸入參數如表三。

2. 運轉功率歷史輸入(Power History)

此分頁中輸入時間間距(Time Step)、功率歷史(Power History)、軸向功率分佈(Axial Power Profile)等。時間間距輸入選項有 Time 與 Burn-up 兩種，是用指定兩個定分析之間的時間間距，因為涉及分析模式與數值收斂性，使用經驗極為重要。本報告初次分析，時間間距選用 Time 輸入。時間間距最多許可分析個數為 400 個，兩兩間距大小不得超過 50 天，此為程式既有限制。

運轉功率歷史對於燃料行為是關鍵參數，其輸入方式為給予隨時間變化的軸向線性平均功率，因此需要建立一組時間與功率的對應組合(Time Step1、Power 1，Time Step2、Power2，…)，另外功率

變化不得超過 1.5 kw/ft，亦為程式之限制。此分頁的軸向功率分佈採取輸入編號的方式，因此分析時必須於軸向功率分頁中的軸向功率分佈分節點加以定義。此步驟對初學者稍有難度，建議多參考文獻報告並注意限制條件。本報告分析破損案例採用的時間間距、功率歷史、軸向功率分佈如圖十二所示。

3. 軸向功率分佈輸入(Axial Power Profile)

此分頁輸入軸向功率分佈類型(Axial Power Profile)，其內建選項有 User Input 與 Chopped Cosine 兩種，點選前者時，軸向功率必須輸入燃料棒平均線性功率，因此軸向各節點正規畫後(Normalized)之線性功率可能大於 1，亦可能小於 1。使用者必須盡可能依照運轉記錄輸入軸向功率分佈，使分析更具真實性。反之若點選 Chopped Cosine，軸向功率必須輸入節點最大功率，因此軸向各節點功率正規畫之後的線性功率將介於 0 與 1 之間。

軸向功率分佈個數(Number of Shapes)最多可輸入 20 組，亦為程式之限制。本報告將採用多個不同分佈，代表核電廠不同時間，控制棒的布局，希望模擬盡量接近真實狀態。輸入軸向功率分佈時，所對應軸向高度最多可分成 40 段，使用者可依需求自行決定。依此原則建立一系列之軸向高度與正規畫功率的對應組合(Axial Elevation 1、Powers 1，Axial Elevation 2、Powers2，...)。

由於在 FRAPCON 程式中在軸向功率分佈輸入個數上有所限制(最多 20 組)，為了符合 FRAPCON 的限制，於模擬時必須簡化其個數，但也因簡化後導致軸向功率之間變化幅度太大，假若與平均功率沒有配合並控制於合理的功率下運轉，運跑結果將於某些時間點無法收斂，程式將立即停止運跑而無法順利得到正確之結果。

為了能使程式順利產生完整之結果，於是再次簡化軸向功率的個數，選用具代表性且變化幅度較平緩的十組軸向功率分佈，於運轉的前兩個週期期間分別只選用編號一與編號二的軸向功率分佈搭配其運轉功率，以減少運算的複雜性，於最後一週期選擇編號三之編號十的軸向功率分佈搭配其運轉功率，由於最後一週期為主要探討重點因此選擇較多得軸向功率分佈來模擬，經過簡化後程式運跑可以順利完成，其結果將於結論陳述。本計畫採用的軸向功率分佈、個數、軸向高度如圖十三所示。

4. 冷卻系統狀態(Coolant Conditions)

此分頁輸入冷卻環境(Coolant Conditions)的相關參數，其內建選項有 Constant 與 Time Dependent 兩種選擇，另外必須輸入冷卻水壓力(Coolant Pressure)、冷卻內部溫度(Coolant Inlet Temperature)、冷卻流量(Coolant Mass Flux)。本報告輸入數值如表四，分析案例之冷卻環境並未改變，因此不用逐步輸入每個時間間距的數值。由於冷卻系統對於整體燃料行為影響甚大，因此在其它分析時，對選用參數須特別留意。

參、 主要發現與結論

一、 主要發現

1. 將 FRAPCON-3.4a 程式安裝於一般個人電腦上運跑，以程式所附標準案例分析結果來比對，新近不同版本之微軟作業系統並無異常發現。
2. 相鄰時間間隔功率變化與總時間間隔數目有所限制，因此對功率升降載比較頻繁的運轉，燃料行為分析難度較高。
3. 本報告以過去之破損案例所做測試，因為程式有些輸入限制，因此分析時必須將運轉記錄做一定程度之簡化處理。

二、 結論

以相同之破損案例來比較，FRAPCON-3 程式護套應力對運轉的敏感度未能如過去其它程式的分析；基本上 FRAPCON 系列程式是以安全審查為基礎，此種結果不難理解。該案例之主要分析結論如下：

1. 破損棒 16、17 前 2 個週期之軸向功率變化若完整遵循運轉記錄時，程式運算收斂異常，無法完成預期分析；軸向功率經過簡化之後，可於設定時間完成分析。
2. 燃料於第 18 週期起爐後，軸向功率快速變化時發生破損。程式分析於第 18 週期給予比較多組的軸向功率以反應其快速變化，燃料棒護套應力於破損位置呈現相對升高現象如圖十四、十五所示。
3. FRAPCON 程式應用於破損分析必須增加更多測試案例，輸入簡化譬如軸向功率分布之變化，對分析結果之量化評估，尚待後續研究。

(I)
Input

1			
2	Output file name	k2a025_1030_4.out	
3	Case Description	Base Irradiation	
4			
5	Input file name	k2a025_1030_4.in	
6	Location to save input file	C:\frapcon3_4a\FRAPCON-3\FRAPCON-3\FRAPCON-3	(Put \ after last d
7			
8	Output units type	si	
9			
10	Rod Size		British
11	Outer Diameter	10.05 mm	0.395669291
12	Inner Diameter	8.84 mm	0.348031496
13	Pellet Diameter	8.67 mm	0.341338583
14	Stack Length	3796 mm	149.4488189
15	Plenum Length	329 mm	12.95275591
16			
17			
18	Spring Dimensions		
19	spring outer diameter	4.47 mm	0.175984252
20	spring wire diameter	1.37 mm	0.053937008
21	number of spring turns	53	53
22			
23	Pellet Shape		
24	Pellet Height	10.49 mm	0.412992126
25	Central Hole Radius	mm	0
26	Dish Radius	4 mm	0.157480315
27	Dish Depth	0.041 mm	0.001614173

Rod Size			British
Outer Diameter	0	mm	
Inner Diameter	0	mm	
Pellet Diameter	0	cm	
Stack Length	0	m	
Plenum Length	0	in	

圖一 FRAPCON-3.4a 程式界面(Input)

(II)
Power History

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
		0.3413386						0.1574803			7.682737								
		fuel id =		IN	213			dish radius	0.0016142		dish volume	0.001258							
		fuel id =	0					dish depth	0.0016142		pell V/1	0.0913038							
		fuel density =	0.9585					pell height	0.4129921										
7	Time	time	power	Power	Power	time	power	time	power	Axial									
8	step	days	kW/r	kW/r	kW/m	days	kW/r	days	kW/r	Profile #									
9	1	0.000416667	0	0.0004167	0	0	0.00042	0	0.00042	0	1	0.00042	4						
10	2	4.769791667	1.378	4.7697917	1.378	4.5209424	4.76979	4.521	1	1	4.76979	9							
11	3	9.539583333	2.756	9.5395833	2.756	9.0418848	9.53958	9.042	1	1	9.53958	14							
12	4	14.309375	4.134	14.309375	4.134	13.562827	14.30938	13.563	1	1	14.30938	19							
13	5	19.07916667	5.512	19.079167	5.512	18.083777	19.07917	18.084	1	1	19.07917	24							
14	6	23.848958333	6.890	23.848958	6.890	18.008311	23.84896	18.008	1	1	23.84896	29							
15	7	28.61875	8.268	28.61875	8.268	17.932845	28.61875	17.933	1	1	28.61875	34							
16	8	33.388541667	9.646	33.388542	9.646	17.857379	33.38854	17.857	1	1	33.38854	39							
17	9	38.158333333	11.024	38.158333	11.024	17.781913	38.15833	17.782	1	1	38.15833	44							
18	10	42.928125	12.402	42.928125	12.402	17.706447	42.92812	17.706	1	1	42.92812	49							
19	11	47.697916667	13.780	47.697917	13.780	17.630981	47.69791	17.631	1	1	47.69791	54							
20	12	52.467708333	15.158	52.467708	15.158	17.555515	52.46771	17.556	1	1	52.46771	59							
21	13	57.2375	16.536	57.2375	16.536	17.480049	57.2375	17.480	1	1	57.2375	64							
22	14	62.007291667	17.914	62.007292	17.914	17.404583	62.00729	17.405	1	1	62.00729	69							
23	15	66.777083333	19.292	66.777083	19.292	17.329117	66.77708	17.329	1	1	66.77708	74							

Time/Burnup	Power	Axial Power Shape Number
time	Input powers are rod	Axial
time	power	Power
burnup	kW/r	Profile #
	10	1

圖二 FRAPCON-3.4a 程式界面(Power History)

**(III)
Axial
Power Profile**

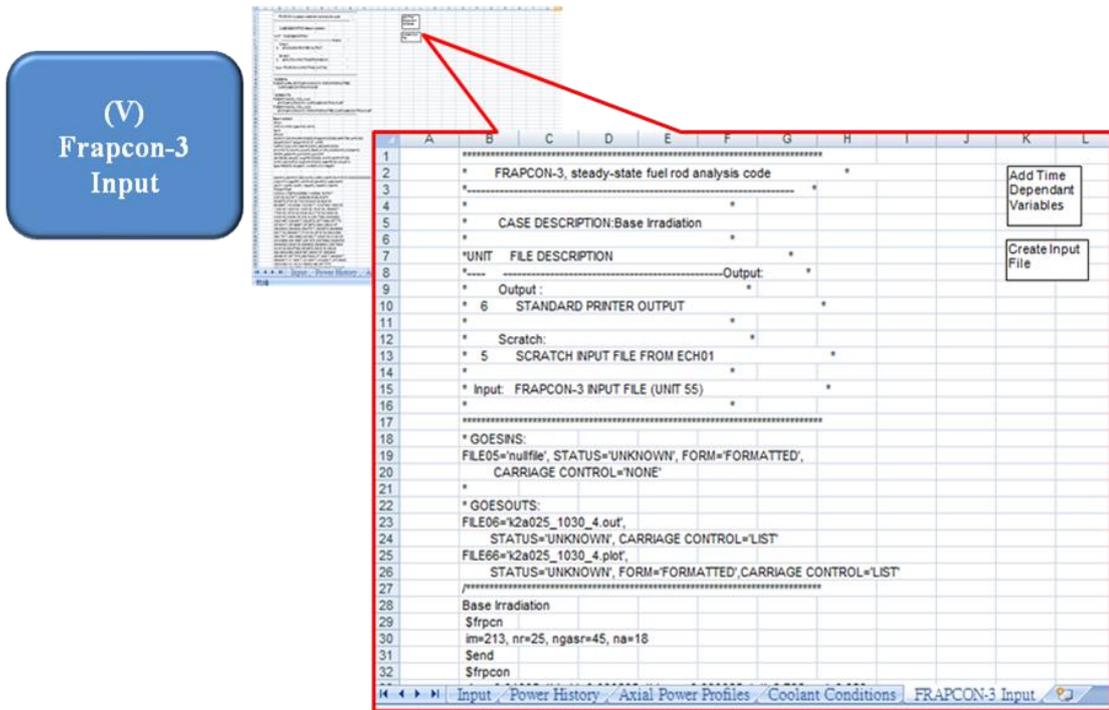
5	Axial Power Profile	user input				iq =			0		iq=0, fa=1
6		user input				fa =			1		
7		chopped cosine									
8		input powers are rod average powers									
9	Number of shapes	10									
10											
11											
12		#1		#2		#3		#4		#5	
13		26		26		26		26		26	
14											
15		Axial	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial	Axial
16		Elevation	Power	Elevation	Power	Elevation	Power	Elevation	Power	Elevation	Power
17		m	Profile	m	Profile	m	Profile	m	Profile	m	Profile
18		1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19		2	0.152	0.21	0.152	0.192	0.152	0.234	0.152	0.504	0.152
20		3	0.304	0.756	0.304	0.609	0.304	0.67	0.304	1.346	0.304
21		4	0.456	1.03	0.456	0.811	0.456	0.848	0.456	1.548	0.456
22		5	0.608	1.198	0.608	0.965	0.608	0.973	0.608	1.555	0.608
23		6	0.76	1.373	0.76	1.083	0.76	1.006	0.76	1.500	0.76

圖三 FRAPCON-3.4a 程式界面(Axial Power Profile)

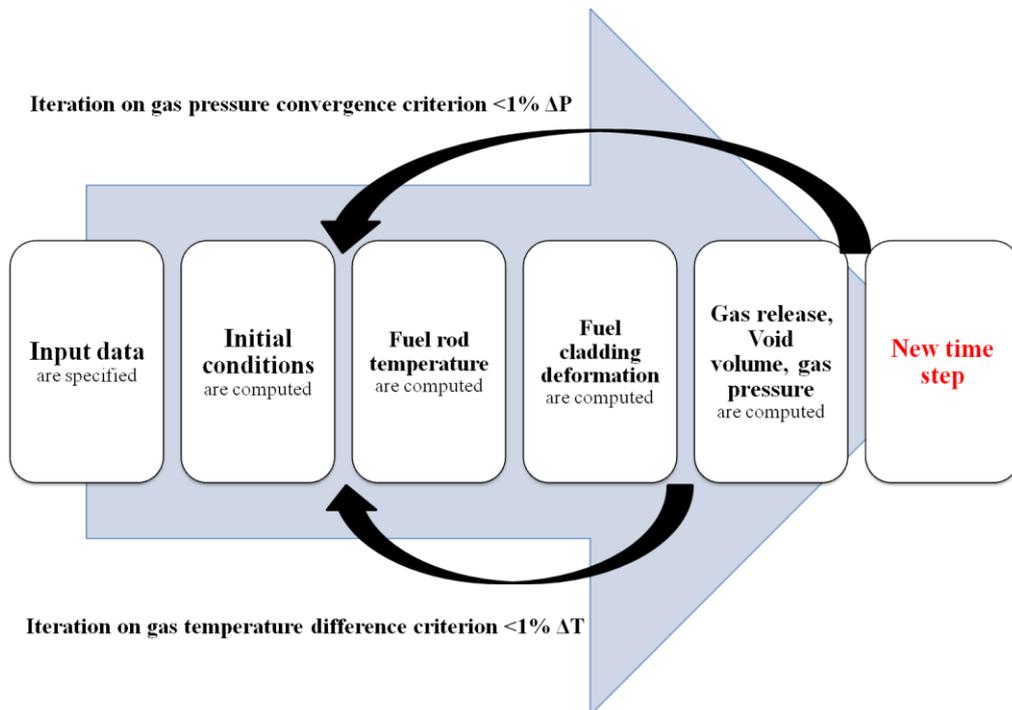
**(IV)
Coolant
Conditions**

3	Coolant Conditions	constant				nsp =			0	
4		constant								
5		time-dependant								
6		Fill out this table								
7	coolant pressure	1050 psi		1050 psi		7239497 Pa				
8	coolant inlet temperature	421.5 °F		421.5 °F		489.53889 K				
9	coolant mass flux	1533.7 kg/s-m ²		1128511.8 lb/hr-ft ²		1533.7 kg/s-m ²				
10										
11		Don't do this table								
12										
13		coolant		coolant		coolant		coolant		
14		pressure		inlet temperature		mass flux				
15	Time Step Number	psi	Pa	°F	K	lb/hr-ft ²				
16		1		0		255.4				
17		2		0		255.4				
18		3		0		255.4				
19		4		0		255.4				

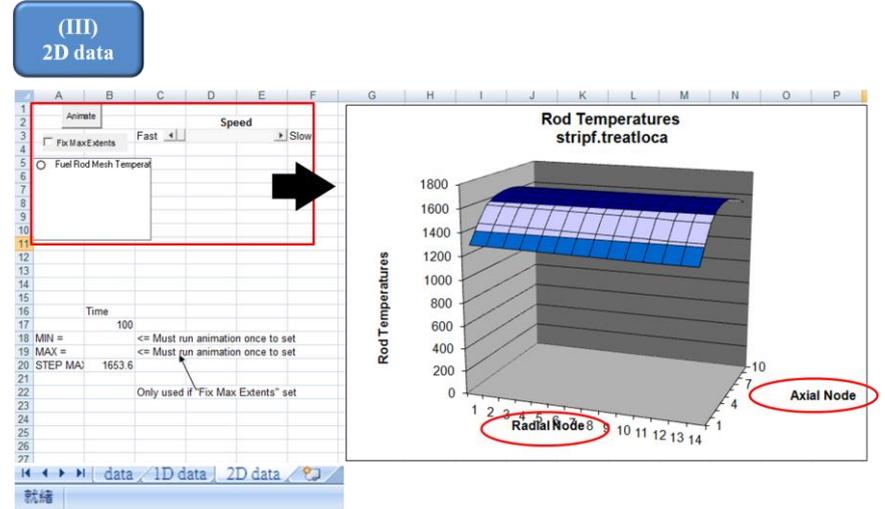
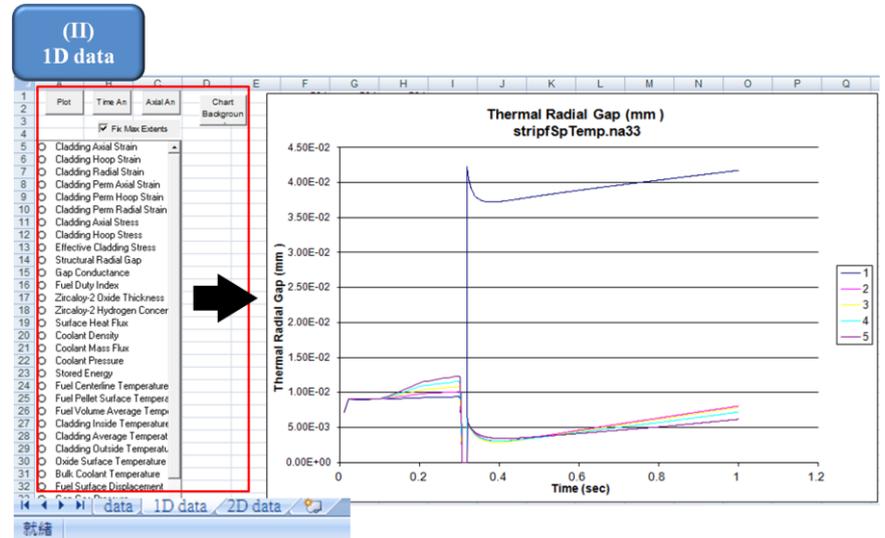
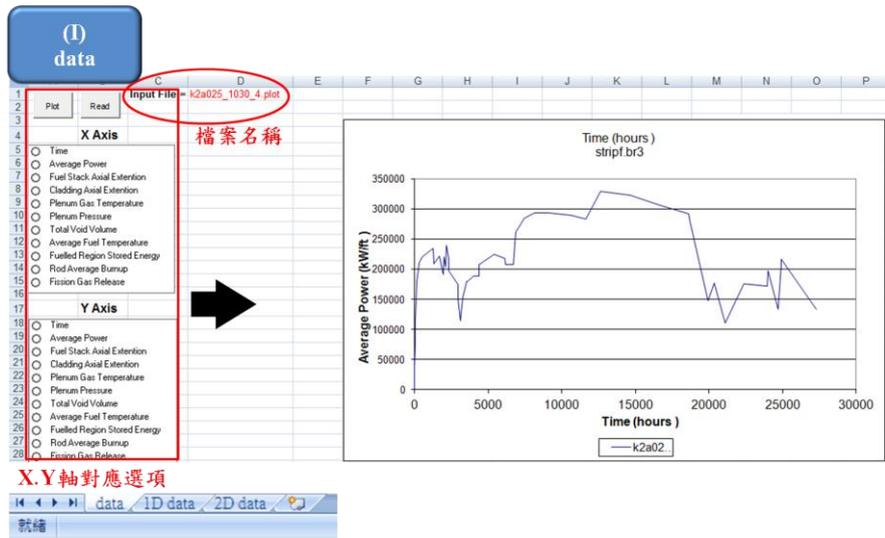
圖四 FRAPCON-3.4a 程式界面(Coolant Conditions)



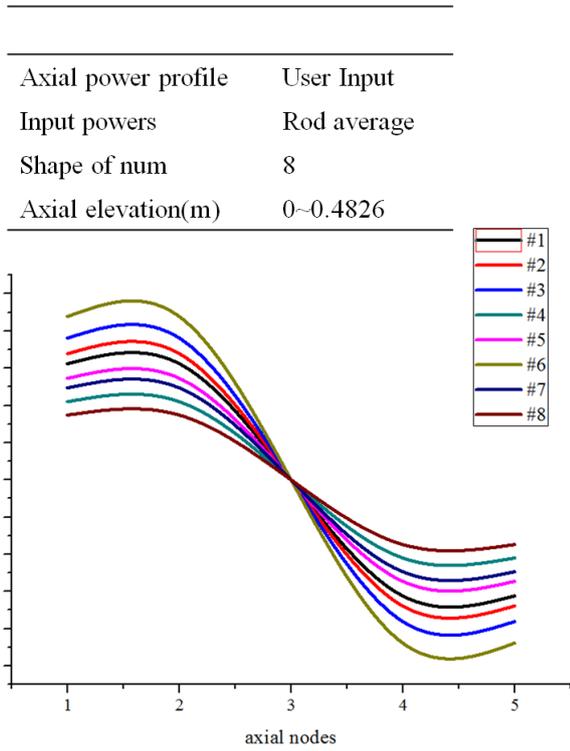
圖五 FRAPCON-3.4a 程式界面(FRAPCON-3 input)



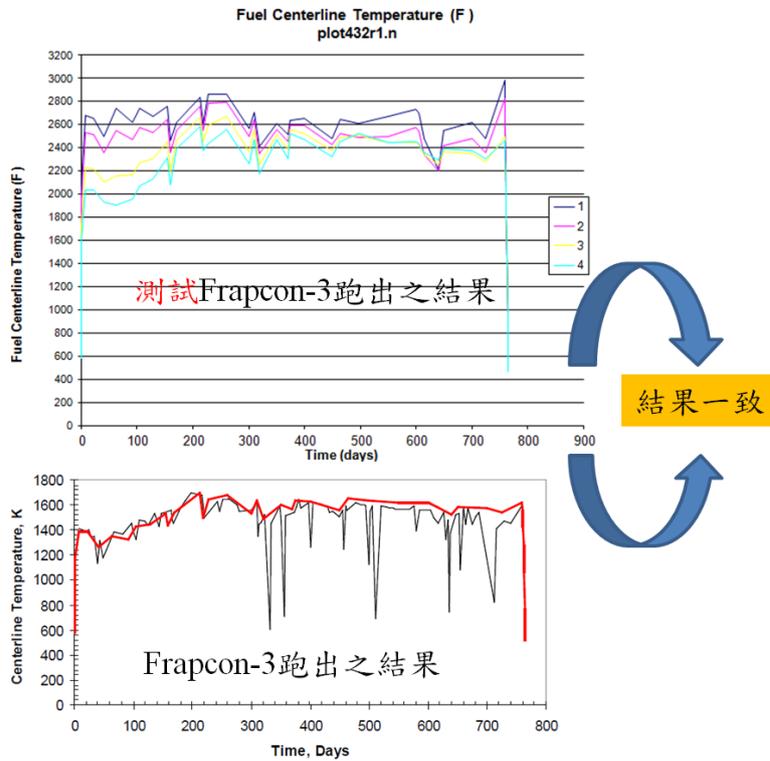
圖六 程式分析架構



圖七 FRAPCON-3.4a 畫圖程式界面

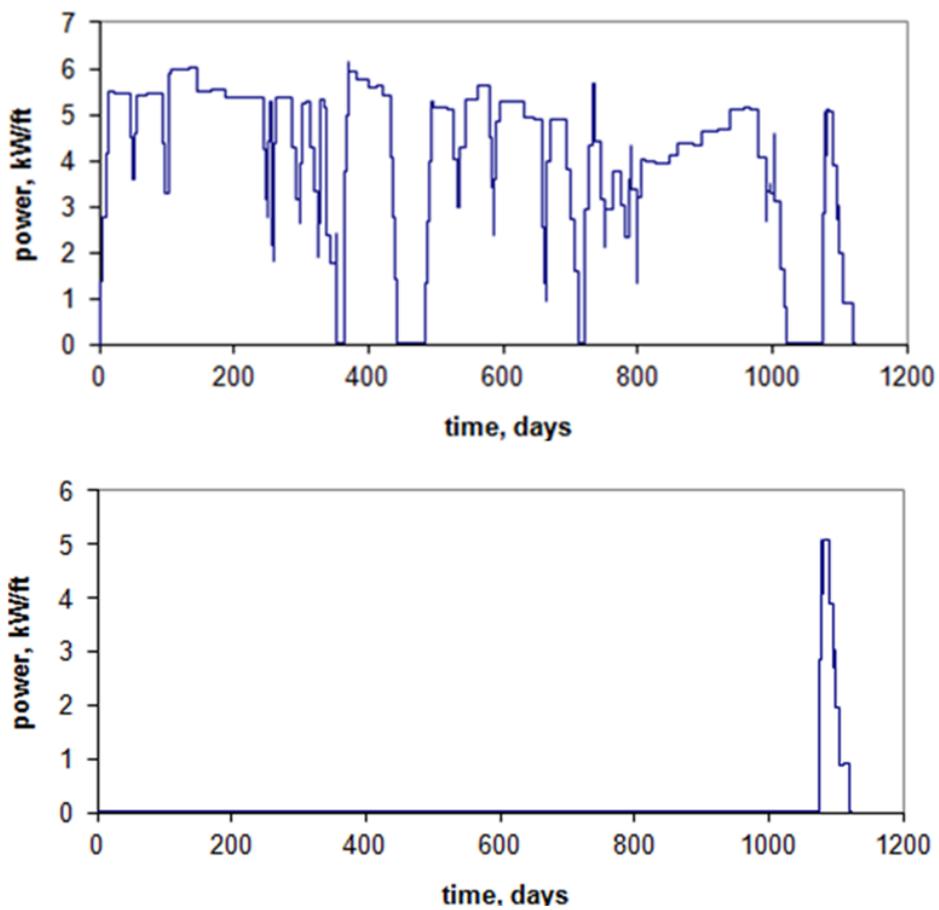


圖十 軸向功率分佈、個數與軸向對應高度



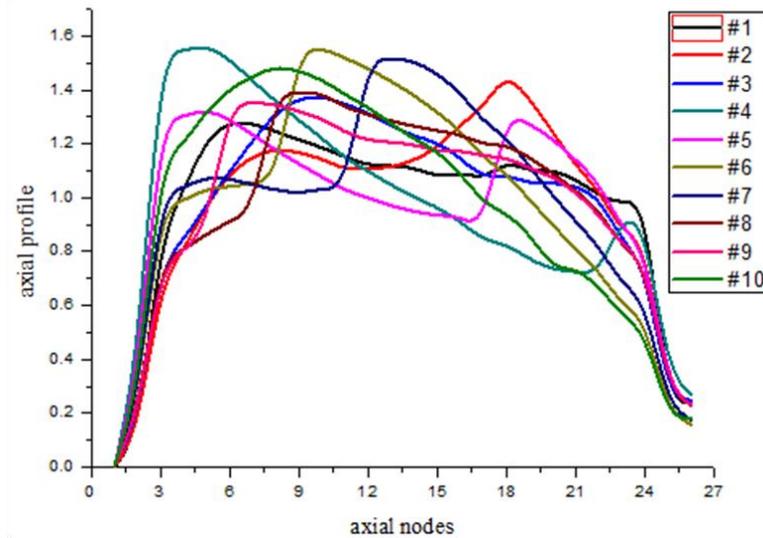
圖十一 測試結果比較

	Time Step	Days
	16週期	1-94
	17週期	95-184
	18週期	185-213
	16-18週期	1-213
		0.04-485
		487.7075-1063.25
		1074-1122.25
		0.04-1122.25

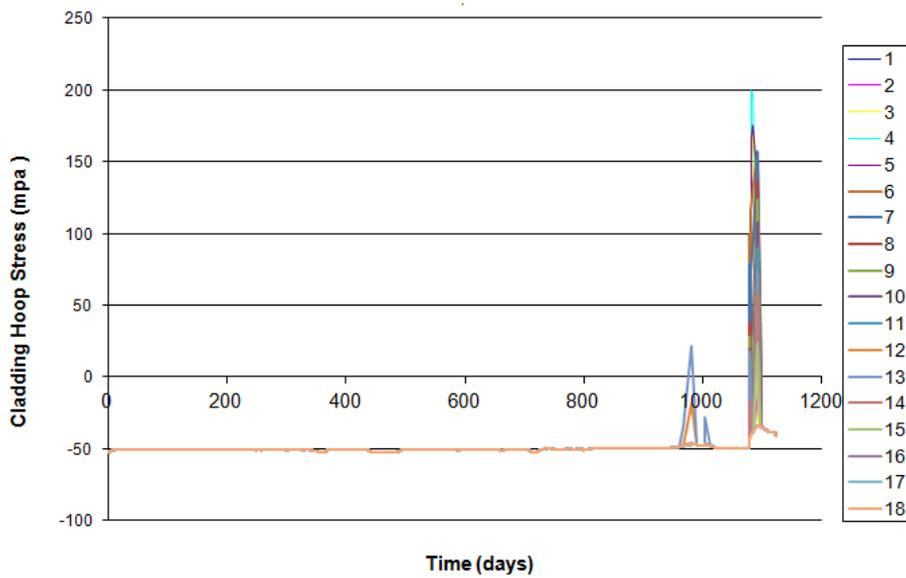


圖十二 週期 16-18 功率運轉歷史

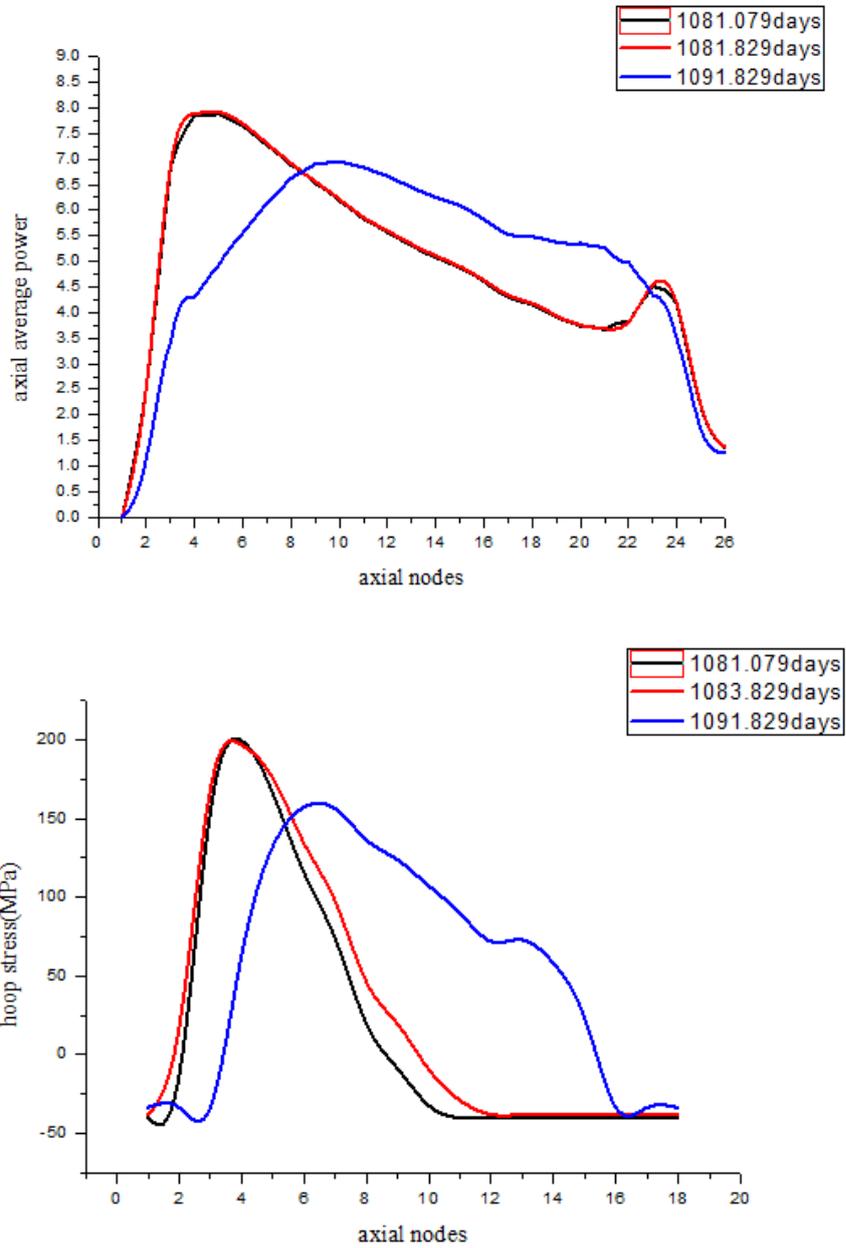
Axial power profile	User Input
Input powers	rod average
Shape of num.	10
Axial elevation(m)	0~3.796



圖十三 軸向功率分佈、個數與軸向對應高度



圖十四 燃料棒護套之 Hoop Stress 分佈



圖十五 第 18 週期燃料護套 Hoop Stress 與軸向線性功率關係

Rod		Pellet			
Size(mm)	Outer Diameter	12.79	Shape(mm)	Pellet Height	12.7
	Radial gap thickness	0.1143		Central Hole Radius	
	Cladding wall thickness	0.9398		Dish Radius	0
	Stack Length	4826		Dish Depth	0
Spring dimension(mm)	Plenum Length	200	Isotopic	Fuel U-235 Enrichment(%)	10
	spring outer diameter	8.89		UO ₂ or MOX?	UO ₂
	spring wire diameter	7.62		O/M ratio	2
	number of spring turns	5		Gadolinia content(wt fraction)	0
Fill conditions	Fill gas pressure(Mpa)	0.1014		water in pellet(ppm)	0
	Fill Gas	helium		nitrogen in pellet(ppm)	0
Reactor Conditions				percent IFBA rods in core(%)	0
Type of plant	HBWR			Boron-10 enrichment in ZrB ₂ (atoms%)	0
Rod pitch(mm)	14.224			ZrB ₂ layer thickness(mm)	0
Crud model	constant thickness			Density of ZrB ₂ (%T.D.)	0
Initial crud thickness(miles)	0		pellet density(%)	95.5	
(miles/hr)	0		open porosity(%)	0	
Convert W/g to n/m²/s	5*5.0E+15		Fabrication	pellet surface roughness(microns)	0.000085
			expected density increase(kg/m ³)	75	
			sintering temperature(°F)	2911	

表一

coolant pressure	coolant inlet temperature	coolant mass flux
500psi	464F	0kg/s-m ²

表二 測試冷卻系統參數

Rod		Pellet			
Size(mm)	Outer Diameter	10.05	Shape(mm)	Pellet Height	10.49
	Inner Diameter	8.84		Central Hole Radius	
	Pellet Diameter	8.67		Dish Radius	3.09
	Stack Length	3796		Dish Depth	0.041
Spring dimension(mm)	Plenum Length	329	Isotopic	Fuel U-235 Enrichment(%)	5
	spring outer diameter	4.47		UO ₂ or MOX?	UO ₂
	spring wire diameter	1.37		O/M ratio	2
	number of spring turns	53		Gadolinia content(wt fraction)	0
Fill conditions	Fill gas pressure(Mpa)	0.653		water in pellet(ppm)	0
	Fill Gas	helium		nitrogen in pellet(ppm)	0
Reactor Conditions				percent IFBA rods in core(%)	0
Type of plant	BWR			Boron-10 enrichment in ZrB ₂ (atoms%)	0
Rod pitch(mm)	12.95			ZrB ₂ layer thickness(mm)	0
Crud model	constant thickness			Density of ZrB ₂ (%T.D.)	0
Initial crud thickness(miles)	0			pellet density(%)	95
(miles/hr)	0			open porosity(%)	0
Convert W/g to n/m²/s	2.21E+16			pellet surface roughness(microns)	63
				expected density increase(kg/m ³)	0
			sintering temperature(°F)	2911	

表三 燃料棒設計參數與爐心環境

coolant pressure	coolant inlet temperature	coolant mass flux
1050psi	421.5°F	1533.7kg/s-m ²

表四 冷卻系統參數

肆、參考文獻

1. K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, “FRAPCON-3.4: A Computer Code for the Calculation of Steady-State Thermal-Mechanical Behavior of Oxide Fuel Rods for High Burn-up”, Pacific Northwest National Laboratory, Richland Washington, 2011.
2. W.G. Luscher and K.J. Geelhood, “Material Property Correlations: Comparisons between FRAPCON-3.4, FRAPTRAN 1.4, and MATPRO”, Pacific Northwest National Laboratory, Richland Washington, 2011.
3. K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer(2011), “FRAPCON-3.4: Integral Assessment”, Pacific Northwest National Laboratory, Pacific Northwest National Laboratory, Richland Washington, 2011.
4. C Powers, et al., Hot Cell Examinations Results of Non-Classical PCI Failures at Ls Salle, Proceedings of the 2005 Water Reactor Fuel Performance Meeting, October 2~6, Kyoto, Japan.
5. C.K. Chao and Che-Chung Tseng, “Pellet Crack Mechanism at Power Ramps, Journal of Nuclear Materials, vol.199, p.159-166.
6. C.K. Chao and Che-Chung Tseng, “A Power-Rate-Dependent Model for Pellet/Cladding Mechanical Interaction, “Nuclear Technology, 101,202, 1993.
7. 曾哲聰，FALCON程式簡介與破損案例分析，台電核能月刊297，中華民國96年9月。
8. 曾哲聰，核燃料爐心行為分析實例，台電核能月刊317，中華民國98年5月。
9. Che-Chung Tseng and K Y Huang, “FRAPCON-2 Prediction of the Fuel Centerline Temperatures in IFA-431 and IFA-432 Assemblies ,”INER-0586, Institute of Nuclear Energy Research, 1985.