

行政院原子能委員會

委託研究計畫研究報告

高燃耗用過核子燃料行為保守分析技術建立
A Conservative Methodology of Fuel Behavior Analysis

計畫編號：1032001INER042

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：孫銘宏

報告日期：103 年 11 月 28 日

目錄

| | |
|----------------|----|
| 中文摘要..... | 1 |
| 英文摘要..... | 2 |
| 作者及所屬單位..... | 3 |
| 壹、計畫緣起與目的..... | 4 |
| 貳、研究方法與過程..... | 5 |
| 2.1 研究過程..... | 7 |
| 2.2 研究結果..... | 8 |
| 參、主要發現與結論..... | 10 |
| 3.1 主要發現..... | 10 |
| 3.2 結論..... | 11 |
| 肆、參考文獻..... | 25 |

中文摘要

國內核電廠配合運轉營運策略，燃料燃耗逐步提高，核燃料供應廠家為驗證其設計，皆會提供燃料行為分析報告，並經主管機關核備。核燃料退出爐心之後進入水池存放，而其功率運轉行為也會影響多年後進入乾式貯存的起始條件。此時燃料行為分析方法則必須以保守性為主要考量，也是貯存期間燃料劣化評估的關鍵因素。由於核電廠爐心燃料棒為數甚多，廣泛進行分析並非務實作法，宜建立一個具有保守性的燃料棒行為分析觀念，藉由少數經過歸納比對的分析結果，進而取得具代表性的分析方法。

本文應用 FRAPCON-3 程式進行燃料棒行為模擬分析，並以重要的燃料行為指標，譬如溫度、護套應力、分裂氣體釋出，以及燃料棒內壓等，來確認分析方法於從事燃料行為評估時之保守性。

關鍵字: FRAPCON-3，燃料行為，分析方法

英文摘要

After power operation, the discharged fuels were stored in the spent fuel pool. Following the required cooling time, they are scheduled for dry storage. Therefore, the fuel in core behavior is essential in the evaluation of spent fuel during dry storage. In the study, we use the FRAPCON-3 code to demonstrate a conservative methodology in the fuel behavior analysis.

To evaluate the fuel performance, the simplified power history was set up first. Therefore, typical operations should be identified. Then an unrealistic power history was created, and the corresponding fuel analyses would verify the conservatism. The critical items of fuel behavior such as temperature, cladding stress and rod internal pressure were applied to establish the analysis methodology.

Keywords: FRAPCON-3, fuel behavior, analysis methodology

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

美國 NRC 於 2000 年期後，大力支持將 FRAPCON 程式升級成為第 3 版，核能研究所獲得 NRC 同意之後也引進該程式。FRAPCON 程式過去為管制單位廣泛應用於業者申照審查，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。核研所對該程式舊的版本原已具備相關經驗，引進新版本之後，規劃程式之安裝、運跑與測試，並參考破損案例，進程式模擬分析。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，為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。本計畫主要目的為建立分析方法與經驗，參考沸水式燃料設計參數並將輸入之參數建檔進而對個案進行分析驗證，經由不同燃料設計與運轉功率歷史之簡化，比較重要燃料運轉行為分析結果，確認分析方法之保守度。

貳、研究方法與過程

FRAPCON-3 程式開發甚為久遠，受限於過去程式設計的架構，分析時對於數值的存取，於數量上受到不少限制，因此使用時與後期陸續開發的 FEMAXI 系列，或是 FALCON 程式相較，限制較多。譬如：功率歷史數量、軸向功率分佈個數、功率變化…等。受到這些限制，對燃料在爐心中複雜的功率歷史與軸向分佈，於模擬分析時必須審慎因應，輸入簡化之功率等數據時，仍應求得合理趨勢與正確結果。

建立功率歷史頁面中時間間距輸入有兩種選項，供使用者使選用；可以是時間(Time)，也可以是燃耗(Burn-up)。時間間距總數 400 個，依據使用手冊說明，因涉及程式分析模式與數值收斂性，時間之間距不得超過 50 天。運轉功率歷史另一重要參數為燃料棒線性功率，對應於輸入的時間間距，線性功率輸入限制為變化不得超過 1.5 kw/ft。實際操作時，電廠之運轉功率，可以用線性方式簡化以符合程式之要求。此分頁中完成前面兩項參數輸入後，另一重點是燃料棒軸向功率分佈；須配合程式另一個分頁軸向功率分佈之波型，以輸入指定編號的方式來完成運轉功率歷史的設定。

軸向功率分佈輸入亦提供兩種選項，第一種為程式內建波形，屬一般中子常態分佈(Chopped cosine)，給定波形頂峰與平均值之間的比值之後，程式可依據燃料長度自動將波形算出。第二種方式為程式使用者依據燃料於爐心中之實際運轉紀錄輸入，由於程式輸入於軸向功率分佈最

多僅能輸入 20 組，因此在分析時仍需對該項次加以簡化。目標是能夠具有代表性又貼近實際運轉，這部份程式使用者必須對燃料照射行為在學理上建立基本認識，累積較多程式分析經驗之後比較容易上手。

在燃料設計參數與冷卻環境的設定輸入方面，原本異動就不頻繁，受到的限制也比較少。分析時對燃料設計參數盡可能求其完整與準確，包含基本的燃料丸尺寸、護套尺寸、燃料丸細部形狀等。若基於特定目的，若專注於護套應力或是燃料丸與護套之機械作用(Pellet-cladding mechanical interaction)，則必須將燃料製造公差考慮進去；譬如最大燃料丸外徑結合護套最小內徑，就是一種保守性分析概念。

程式分析燃料之冷卻環境的設定，輸入方式可為常數輸入(Constant)與隨時間改變(Time dependant)兩種方式，若運轉是穩態的情況下，冷卻環境不隨時間改變而有變動，因此可選擇以常數輸入的方式，來進行分析。燃料在一般核電廠之運轉而言，這是最常見的情形，分析時的輸入方式也相對單純。若分析情況為暫態或冷卻環境隨時間改變的情況，就必須使用第二種方式；依據實際狀況，將每個時間點對應之冷卻溫度、壓力、通量逐一輸入後即可分析。

將以上分析必要之參數輸入完成後，於 FRAPCON-3.4a.exe 運跑程式輸入 Input 檔名即可進行分析，程式的計算過程主要是以疊代循環方式進行，其流程如圖一所示。當運算由 Input data(設計參數)輸入到 Initial conditions(初始條件)設定完成後，分別進行熱分析(燃料棒溫度)與機械

分析(護套變形)計算。計算迴路中燃料丸護套間隙溫度與內部氣體壓力之收斂判斷準則皆為 1%，分析即可進入下一個時間間距。

分析結束後所建立之 output 檔，主要有熱分析溫度分佈與機械分析，變形以及應力應變等兩大部分。其中護套應力應變、燃料棒內壓、分裂氣體釋出、護套氧化層等重要分析項目，皆有利於觀察燃料於爐心中不同運轉條件下的重要行為指標，尤其是護套應力狀態是用來判斷燃料棒破損時機之重要依據。

FRAPCON-3 程式中也包含輸出項目之畫圖程式(aplotter.exe)，方便分析者能由結果迅速了解趨勢，對燃料行為或得整體資訊。程式使用人員完成程式安裝測試之後，宜使用各個範例進行演練，嘗試更改部分設計或是運轉參數。除了可以累積程式使用經驗，亦可對燃料行為做學理上之比對；之後配合一些案例或是個案分析，經過此種歷程方能可為合格之燃料行為程式分析者。

2.1 研究過程

本報告以國內沸水式反應器(BWR)電廠所使用之核燃料為分析對象，使用 FRAPCON-3 程式來模擬燃料於爐心運轉行為。建立方法過程中，以 ATRIUM-9B (9x9)與 ATRIUM-10 (10x10)為分析對象，兩種不同燃料之設計參數如表一、表二，。參考一般常見之爐心運轉功率歷史，假設不同歷史功率：(1) 三個週期分別為：高、中、低之變化，稱為型態 I，如圖二，(2) 三個週期分別為：低、高、低之變化，稱為型態 II，

如圖三，進行高燃耗燃料行為分析保守性研究，比較主要分析項目為燃料中心溫度分佈、氣室壓力、分裂氣體釋出，護套應力等。

由於 FRAPCON-3 在參數輸入上限制較多，因此針對國內核電廠實際運轉功率歷史數據，必須進行適當之簡化工作，如簡化功率歷史變化頻率、軸向功率變化...等，但仍盡量保有其趨勢及合理性。上述型態 I 為遞減型之運轉功率歷史，其各週期之平均運轉功率分別為 6 kw/ft、5.5 kw/ft、4.5 kw/ft；另一運轉功率型態 II，其各週期之平均運轉功率分別為 5 kw/ft、5.5 kw/ft、5 kw/ft。本文將利用這兩種型態之運轉方式觀察其個別分析項目結果，以作為建立保守性分析方法的基礎。

關於軸向功率分佈將採用程式內建之波型(axial shape)，選用 peak 與 average 比值為 1.4 之波型，透過不同型態之運轉功率歷史來建立保守性評估方法時，在程式中軸向功率分佈的輸入有一定程度上的限制，必須簡化真實運轉數據，若將其納入考慮須將增加整體分析上之難度，因此，為避免分析過程產生不必要之變數，軸向功率分佈即選用程式內建之波型。

2.2 研究結果

觀察型態 I 與型態 II 兩種不同功率歷史型態，不論分析 ATRIUM-9B (以下簡稱 A9) 或 ATRIUM-10 (以下簡稱 A10) 兩種不同之燃料設計，在分析項目如氣室壓力、分裂氣體釋出、燃料中心溫度、護套應力、節點燃耗等結果上，型態 I 分析結果如圖四至圖九為 A9 之燃

料設計，圖十至圖十五為 A10 之燃料設計所分析之結果，分析數值顯示，無論是型態 I 或是型態 II，其結果與趨勢均合理，因此在本文中所假設的型態 I 或型態 II 的功率歷史型態在建立保守性分析方法時皆可應用。

保守性分析法主要是希望以簡化之功率歷史來分析燃料行為，取得具代表性，數值又呈現保守的務實作法。根據上述之分析結果可以利用型態 I 之功率歷史來建立分析之邊界，測試過程中，為使分析程序更為方便，以三個週期個別之燃料棒線性平均功率之平均數值作為全程運轉之功率，作為建立保守性方法的功率數值，如圖十六。圖十七至圖二十七為 A9 與 A10 兩種燃料設計，依據此保守功率歷史之個別分析結果，可作為建立燃料貯存行為評估方法之參考。

參、主要發現與結論

依循 FRAPCON-3 程式使用手冊說明的限制，分別就兩種設計 ARTIUM-9B 與 ARTIUM-10 兩種燃料設計參數，搭配兩種不同型態運轉功率歷史，並經適當合理的軸向功率變化，測試燃料行為之保守性分析方法。本文僅就模擬分析時，輸入方法的簡化進行定性探討，若對保守度與信心度有定量要求，未來仍需定義更廣泛的分析計畫。

本研究之概念亦可以推廣於用過核子燃料乾式貯存研究，該領域為燃料長時間之行為變化。作為貯存狀態起始點的爐心運轉模擬分析則必須同時著重燃料護套外表面氧化層厚度、氫含量(氫化鋯析出)對機械性質之效應、護套塑性變形量等項目，此等後續應用有待更周詳的規劃。

3.1 主要發現:

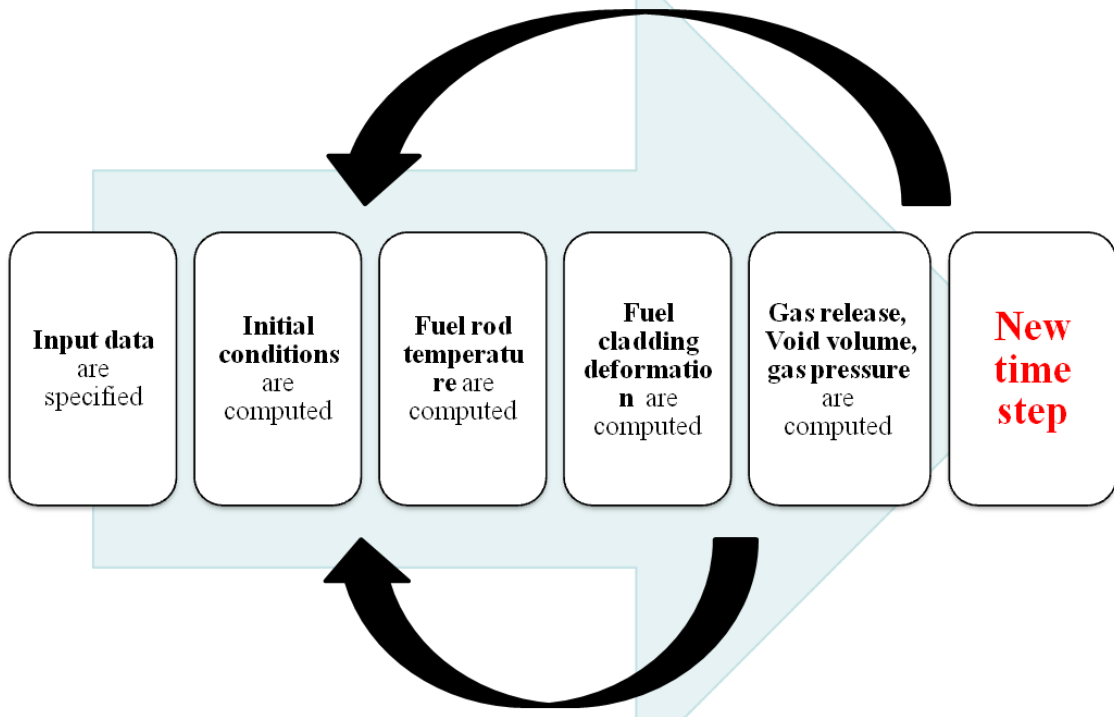
- (1) 模擬核燃料於爐心運轉分析時，時間間隔與軸向功率分佈波形輸入，與程式範例案例相較下更為複雜，因此在運轉功率歷史與軸向功率分佈波形配合頗具挑戰性，須對程式運跑及燃料行為理論具有一定程度之瞭解，方能在調升功率的同時，兼顧軸向功率波形及整體運轉之合理性。否則將容易發生分析過程中，發生數值發散無法收斂的現象，導致程式無法繼續運跑，亦或是程式順利運跑完，但卻得到不合理之運算結果。

- (2) 觀察比較兩種不同型態燃料功率歷史數據與兩種不同燃料設參數所得到之分析項目結果，包含：氣室壓力、分裂氣體釋出、節點燃耗、均隨週期增加而有往上之趨勢如圖三至圖五與圖十至圖十二；燃料中心溫度其變化則是隨著功率歷史之變化趨勢至第三週期如圖六、圖十三；應力數值皆在第三週期略微增加的趨勢如圖八、圖九與圖十四、圖十五；這些重要的燃料行為指標在趨勢上與實際運轉狀況在分析結果初步判斷趨勢合理。

3.2 結論:

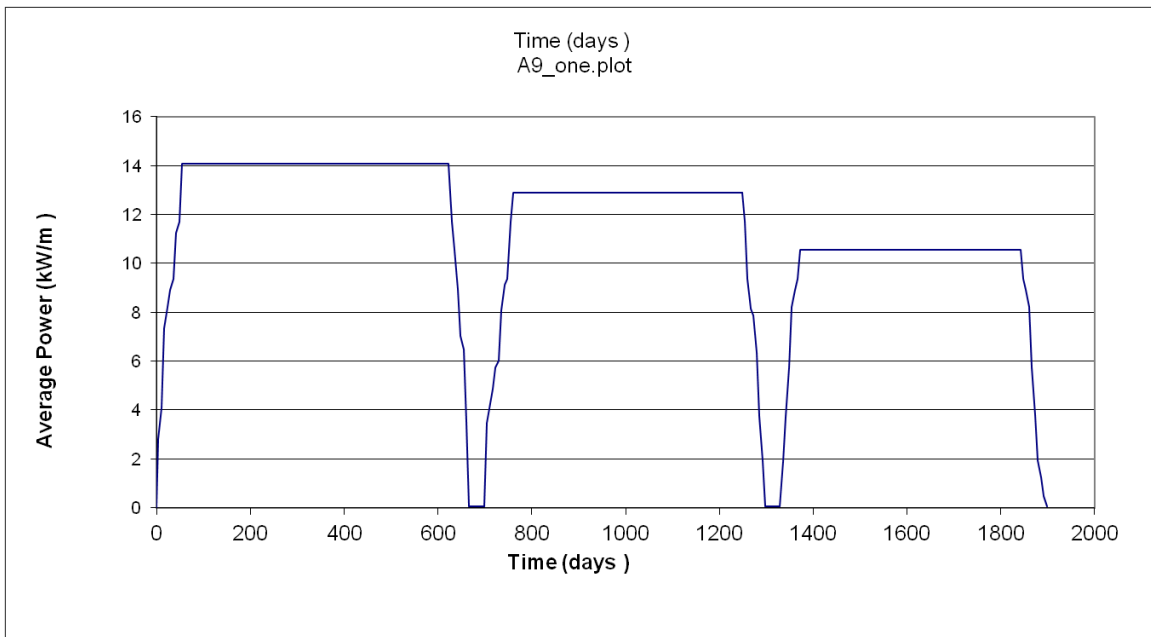
- (1) 保守性評估方法測試中，選用型態 I 平均值的方式如圖十六，在相同燃耗的條件下所得到分析數值均可以涵蓋型態 I 與型態 II 之結果。就所比較的燃料行為而言，在簡化功率歷史時可兼具合理性與保守性。
- (2) 由於 FRAPCON-3 程式使用上限制較多，不論是線性功率，或是軸向功率的變化，對功率變化比較大的燃料棒，建立簡化分析方法後之保守性確認仍須從事更深入的探討。

Iteration on gas pressure convergence criterion $<1\% \Delta P$

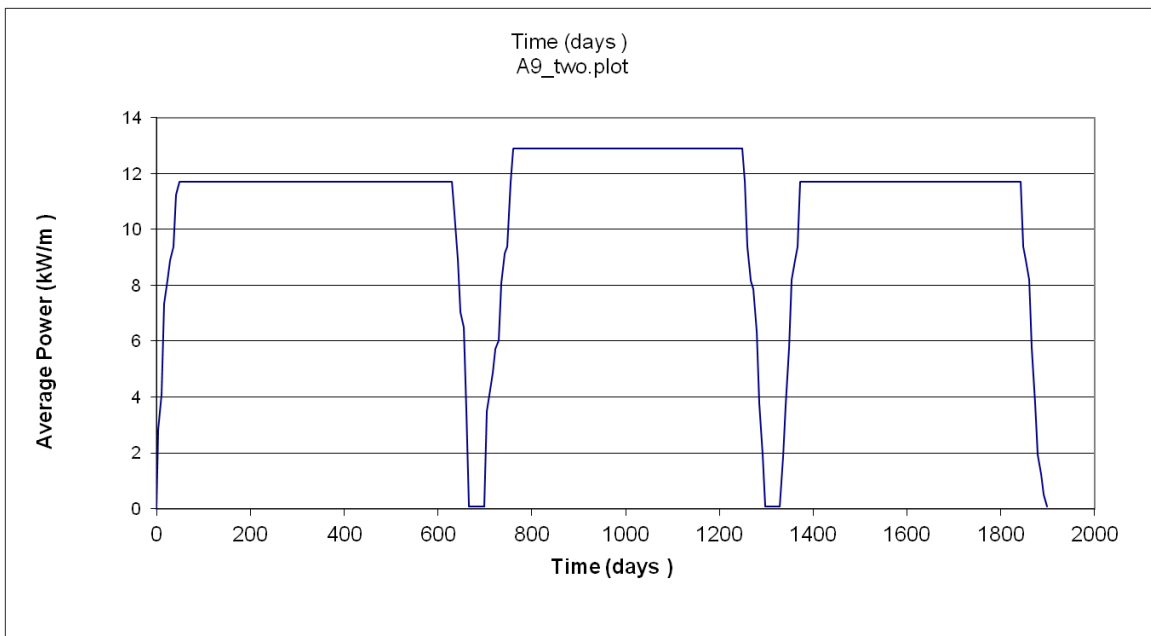


Iteration on gas temperature difference criterion $<1\% \Delta T$

圖一 程式計算流程



圖二 型態 I 功率歷史



圖三 型態 II 功率歷史

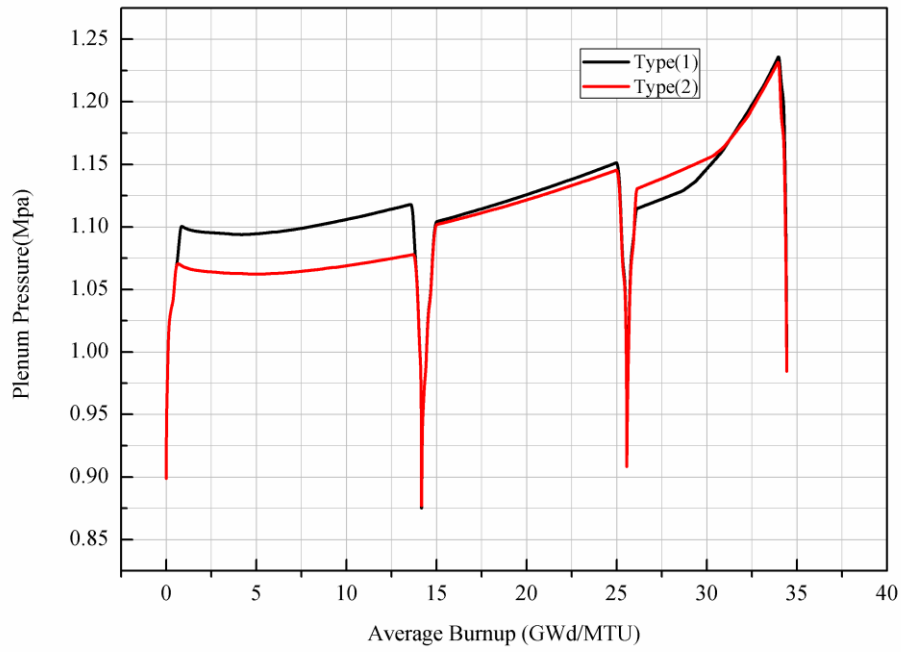


圖 四 A9 型態 I 與 II 之功率歷史之氣室壓力

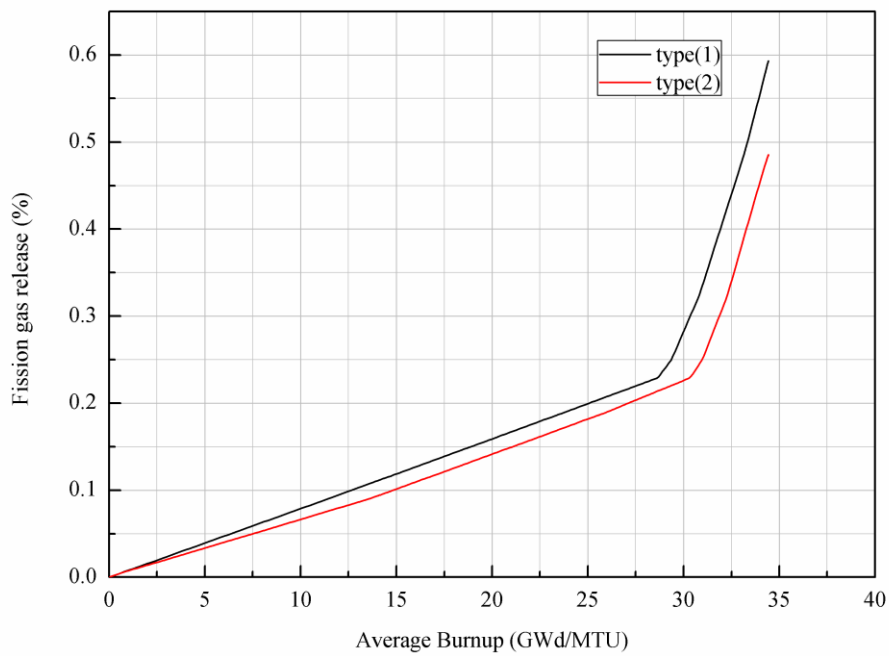


圖 五 A9 型態 I 與 II 之功率歷史之分裂氣體釋出

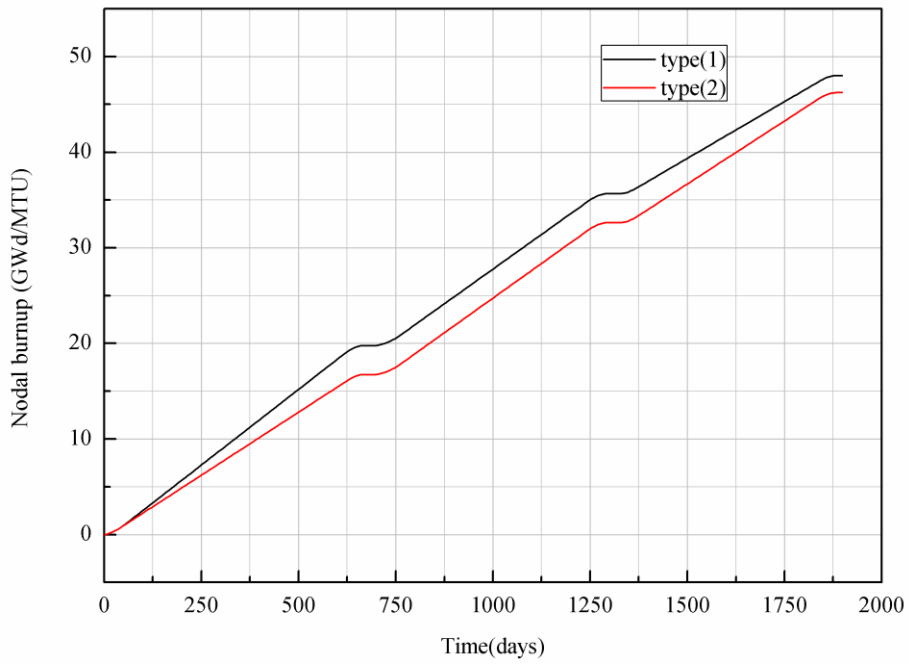


圖 六 A9 型態 I 與 II 之功率歷史之節點燃耗

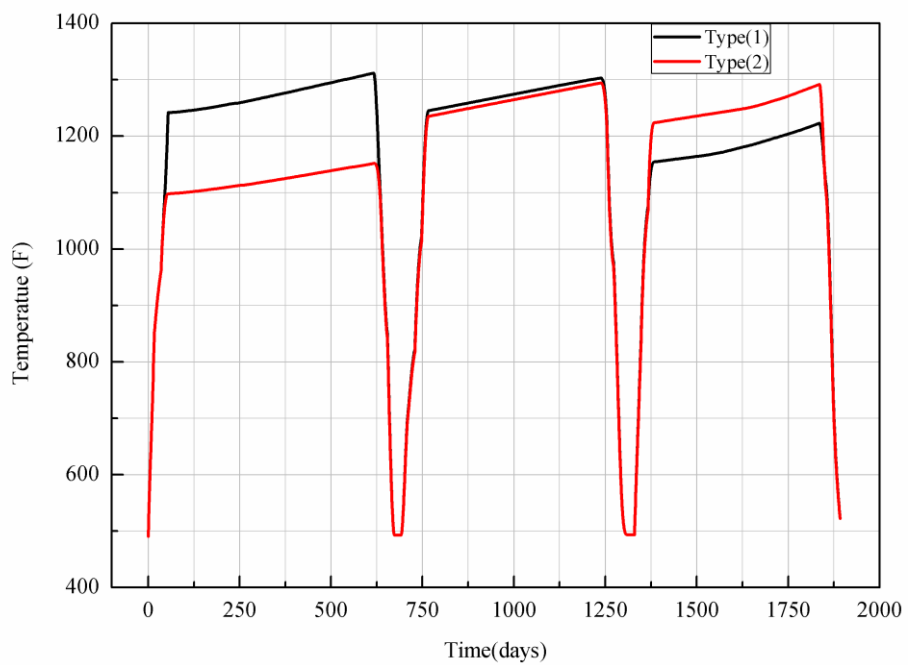


圖 七 A9 型態 I 與 II 之功率歷史之燃料中心溫度

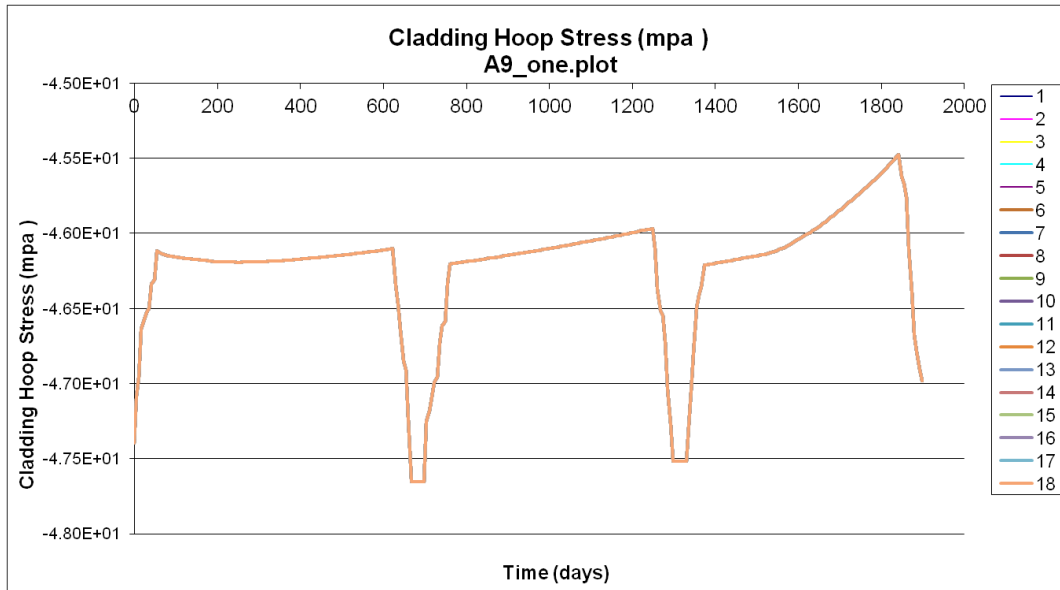


圖 八 A9 型態 I 之功率歷史之環向應力

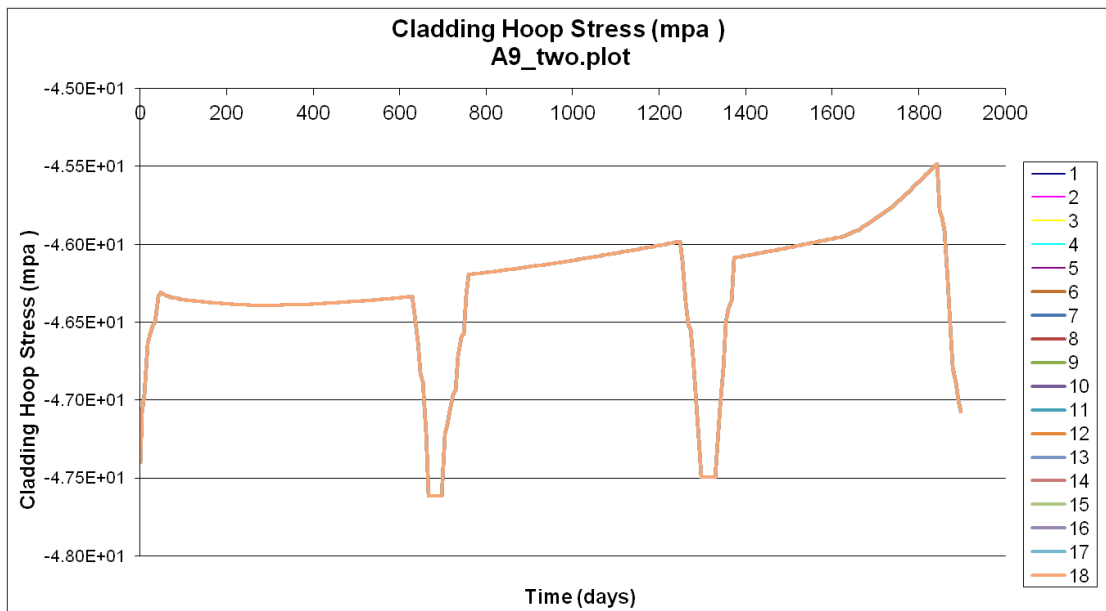


圖 九 A9 型態 II 之功率歷史之環向應力

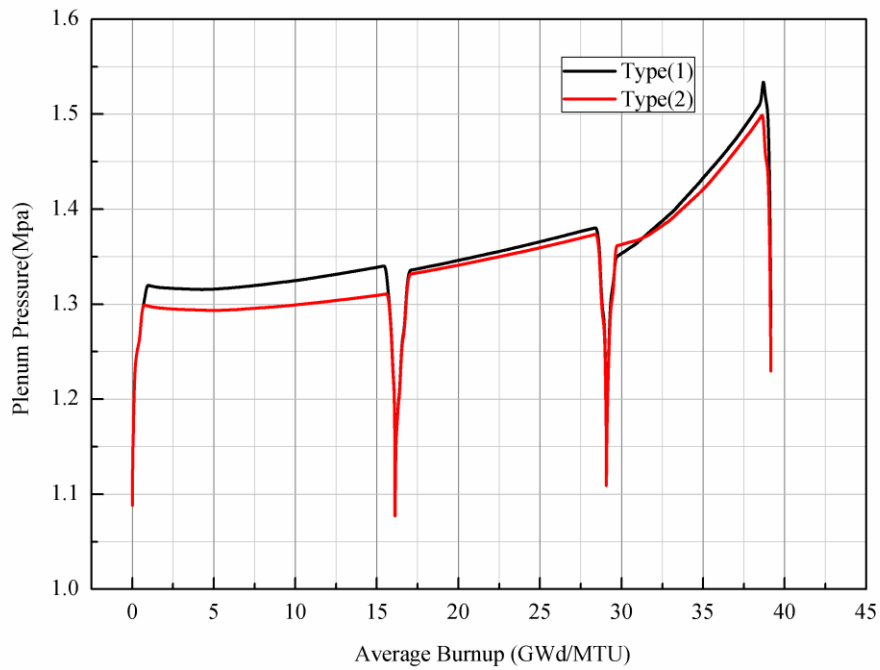


圖 十 A10 型態 I 與 II 之功率歷史之氣室壓力

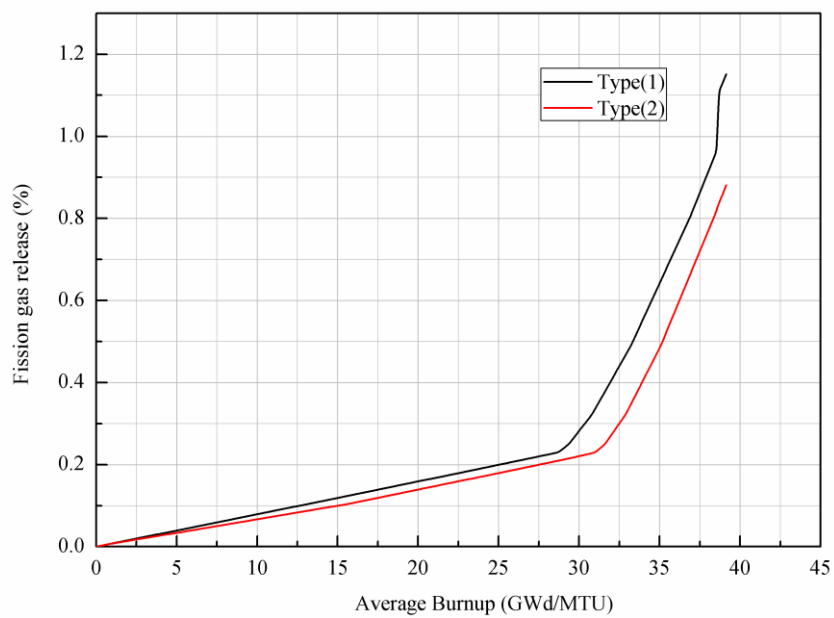


圖 十一 A10 型態 I 與 II 之功率歷史之分裂氣體釋出

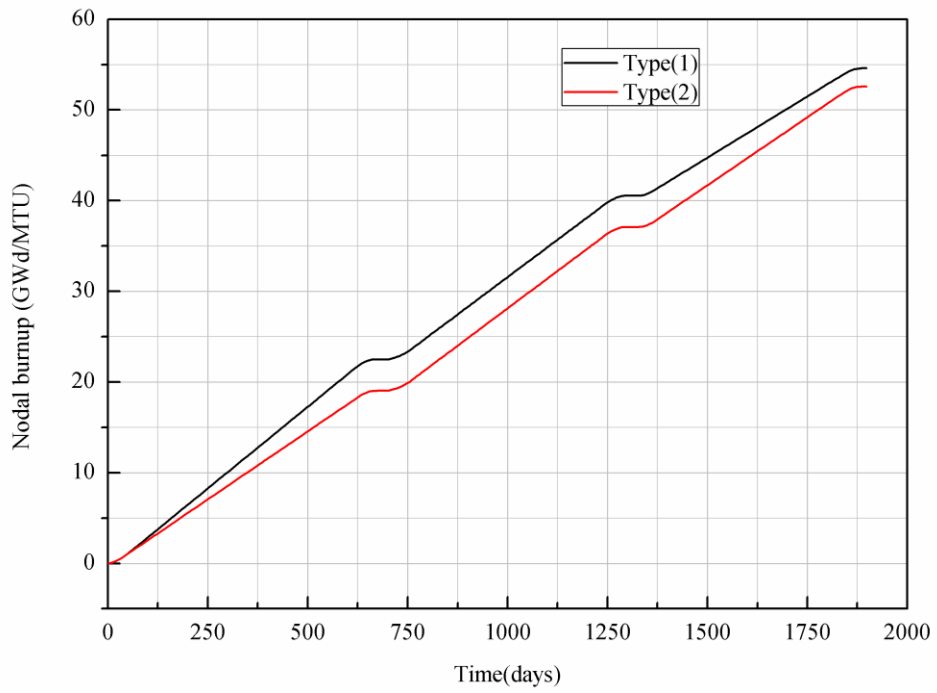


圖 十二 A10 型態 I 與 II 之功率歷史之節點燃耗

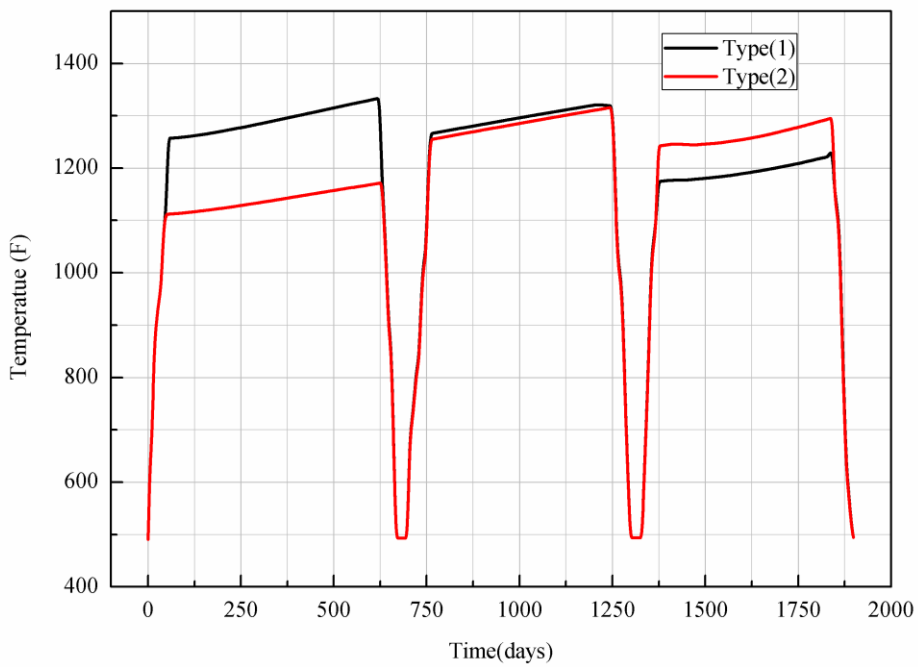


圖 十三 A10 型態 I 與 II 之功率歷史之中心溫度

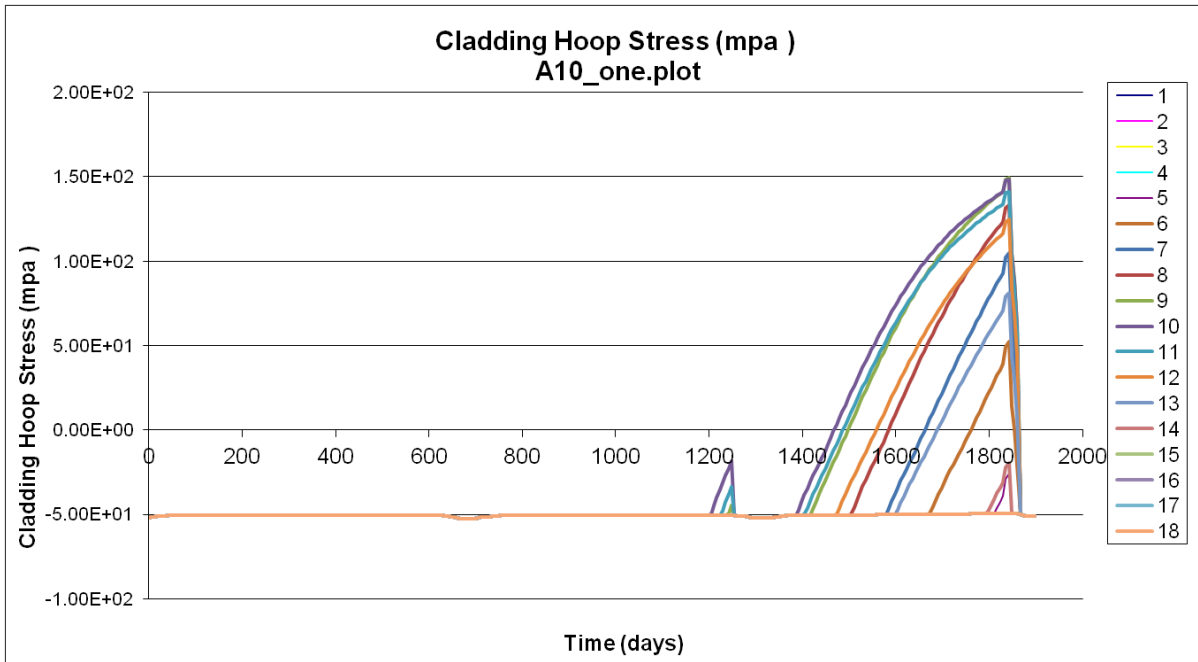


圖 十四 A10 型態 II 功率歷史之護套環向應力

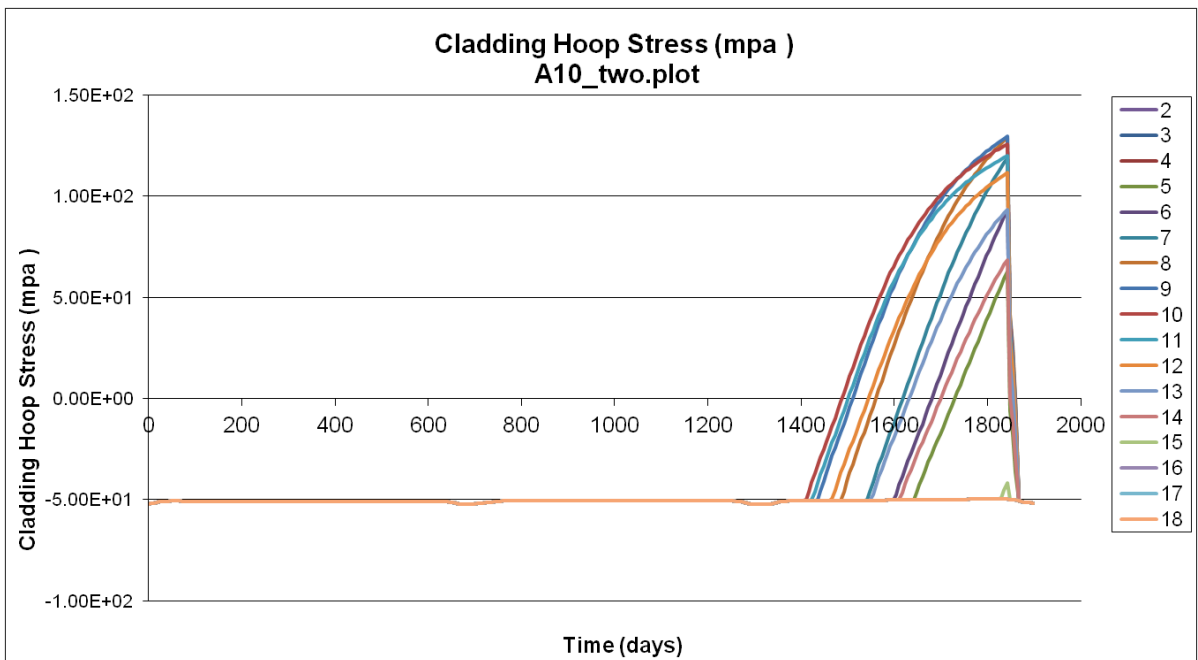


圖 十五 A10 型態 II 功率歷史之護套環向應力

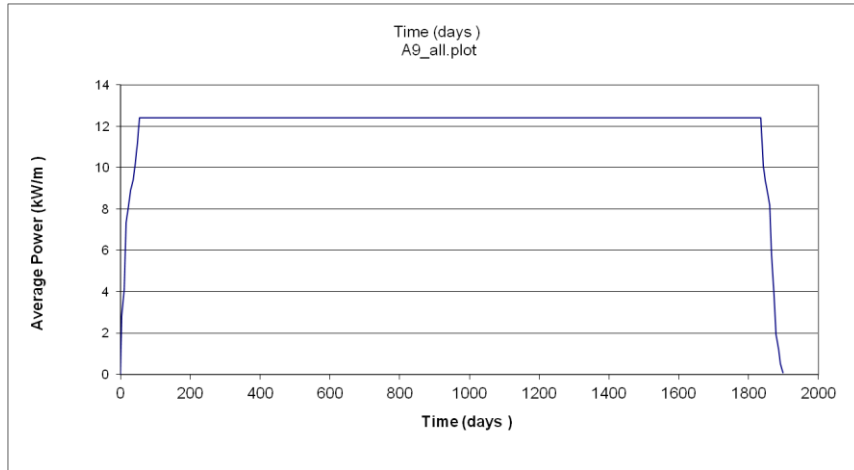


圖 十六 A9 全週期相同功率之功率歷史

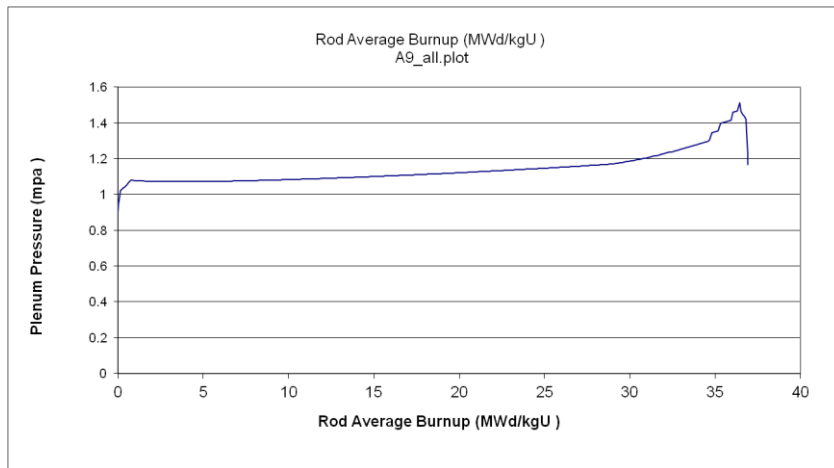


圖 十七 A9 全週期相同功率之氣室壓力

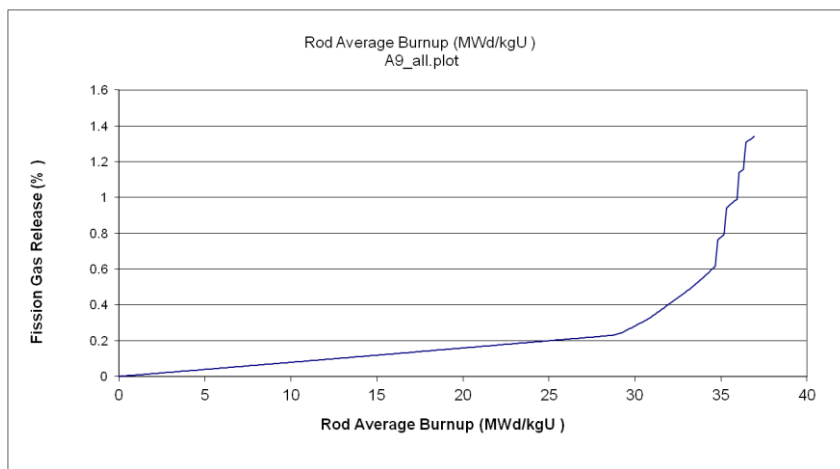


圖 十八 A9 全週期相同功率之分裂氣體釋出

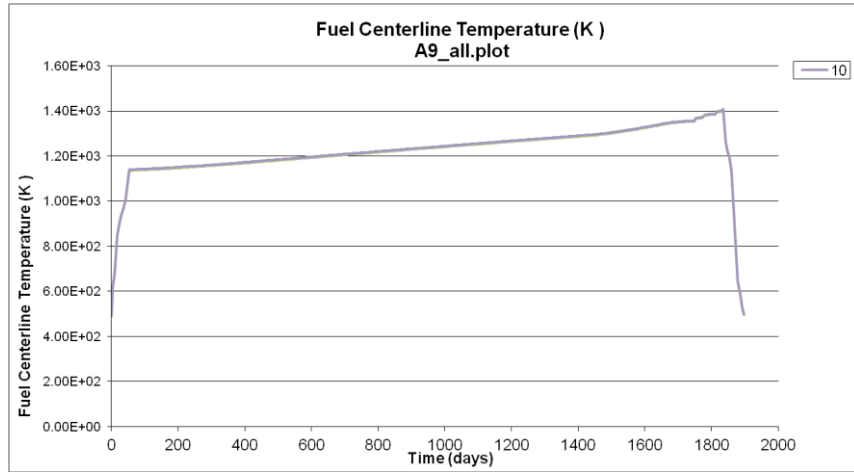


圖 十九 A9 全週期相同功率之燃料中心溫度

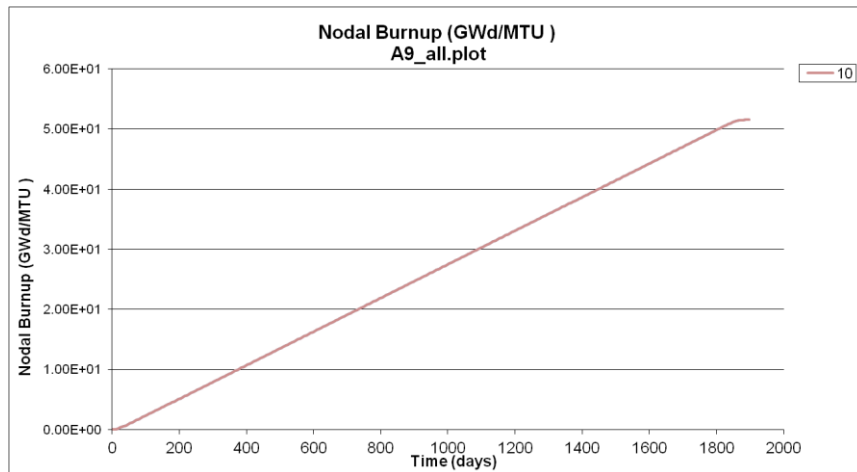


圖 二十 A9 全週期相同功率之節點燃耗

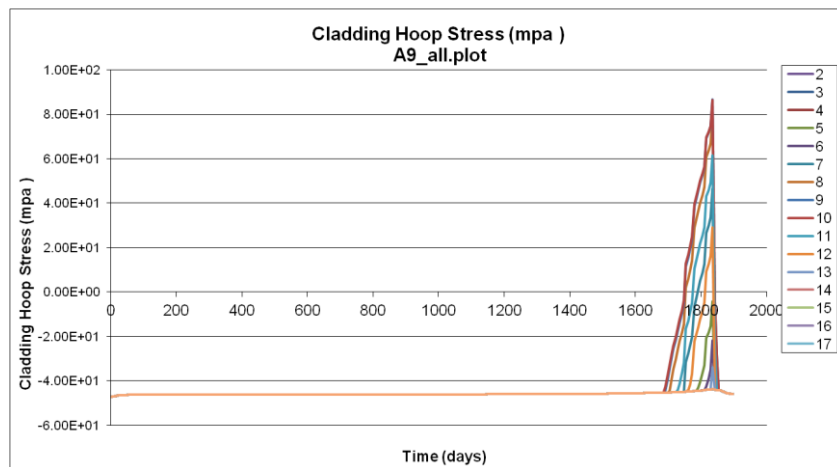


圖 二十一 A9 全週期相同功率之環向應力

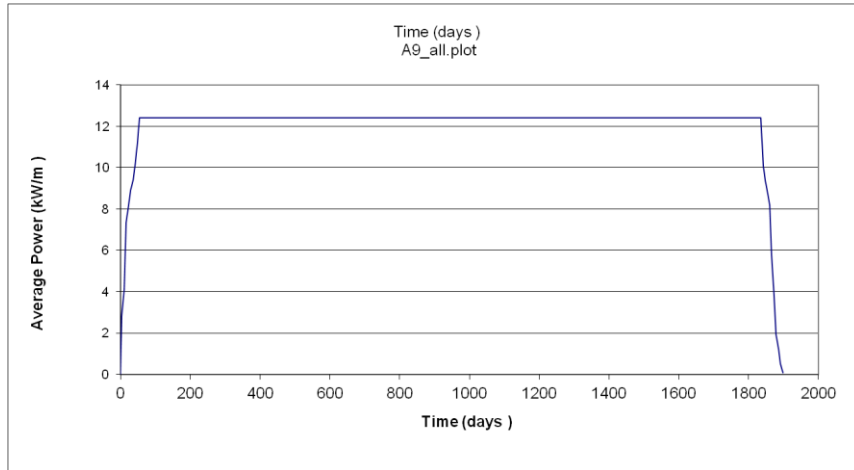


圖 二十二 A10 全週期相同功率之功率歷史

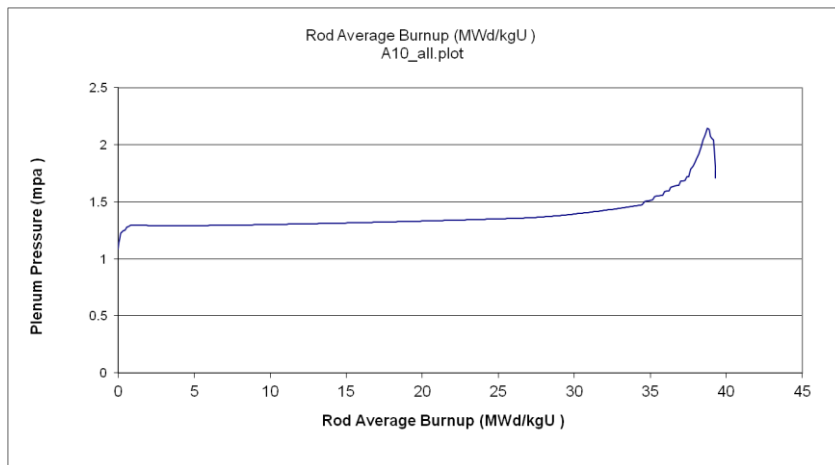


圖 二十三 A10 全週期相同功率之氣室壓力

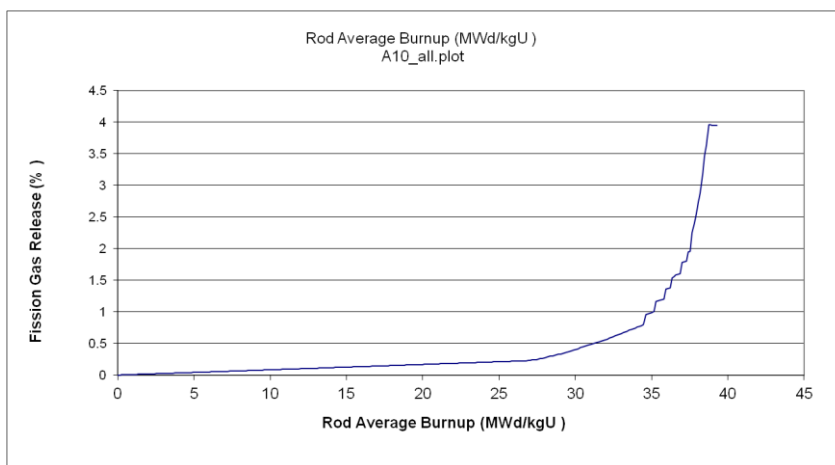


圖 二十四 A10 全週期相同功率之分裂氣體釋出

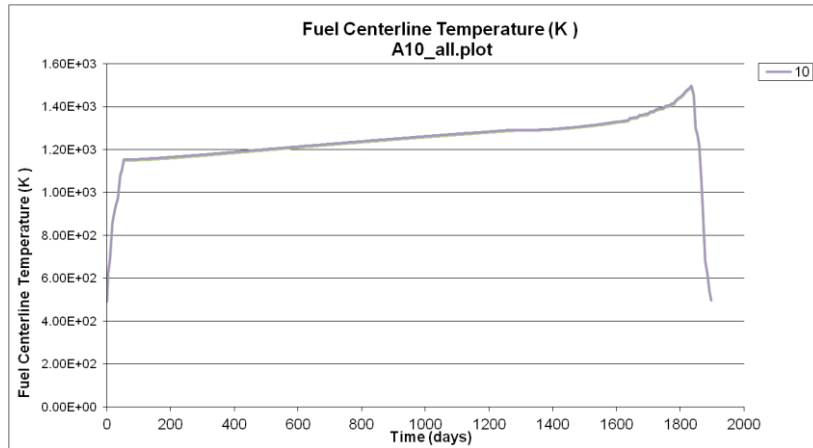


圖 二十五 A10 全週期相同功率之燃料中心溫度

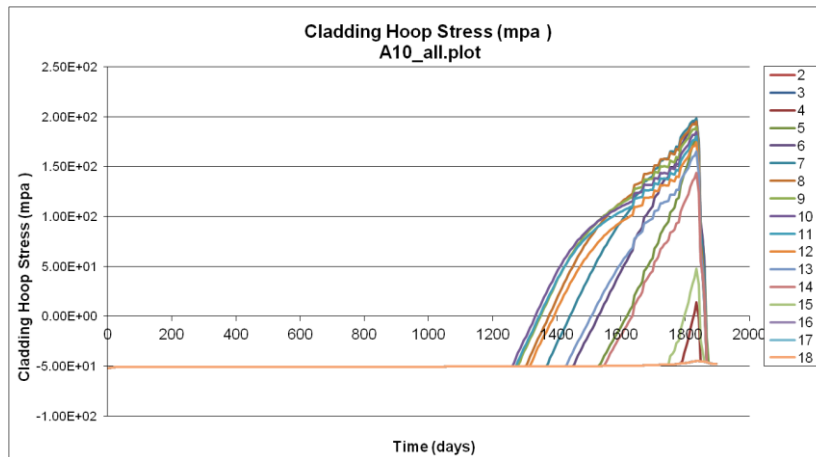


圖 二十六 A10 全週期相同功率之燃料環向應力

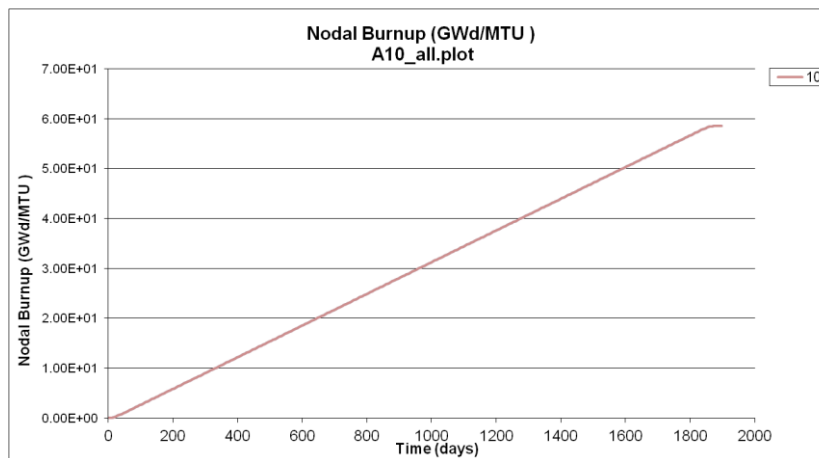


圖 二十七 A10 全週期相同功率之節點燃耗

肆、參考文獻

1. K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer (2011), “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.
2. W.G. Luscher and K.J. Geelhood (2011), “Material Property Correlations: Comparisons between FRAPCON-3.4, FRAPTRAN 1.4, and MATPRO” Pacific Northwest National Laboratory.
3. K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer (2011), “FRAPCON-3.4: Integral Assessment” Pacific Northwest National Laboratory.
4. C.K. Chao and Che-Chung Tseng (1993), “Pellet Crack Mechanism at Power Ramps, Journl of Nuclear Material, 199(159).
5. C.K. Chao and Che-Chung Tseng (1993), “A Power-Rate-Dependent Model for Pellet/Cladding Mechanical Interaction, “Nuclear Technology, 101(202).
6. 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。
7. 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。
8. 孫銘宏，”FRAPCON-3程式燃料行為分析驗證”，核能研究所，中華民國102年。