

文章编号：0258-0926(2016)01-0001-03；doi: 10.13832/j.jnpe.2016.01.0001

# HFETR 氙毒效应计算分析

王 皓，刘水清，马立勇，杨 斌，康长虎

中国核动力研究设计院，成都，610213

摘要：使用数值方法并通过程序的改进完善，在高通量工程试验堆（HFETR）某炉次装载方案的基础上进行不同工况下的氙毒效应计算研究，得到 HFETR 以不同功率运行相同积分功率、以不同功率运行不同积分功率后紧急停堆的氙毒效应曲线。结果表明理论计算与 HFETR 实际运行工况相符，对 HFETR 安全运行具有指导意义，本文计算研究结果已成功应用到 HFETR 实际运行中。

关键词：氙毒效应；数值方法；高通量工程试验堆（HFETR）

中图分类号：TL38\*2 文献标志码：A

## Calculation and Analysis of Xenon Poison Effect Curve in HFETR

Wang Hao, Liu Shuiqing, Ma Liyong, Yang Bin, Kang Changhu

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: Numerical method is applied in this paper. By means of the improvement of program, the xenon effect curves under different working conditions on the basis of loading scheme in some cycle of HFETR is studied and calculated. Also, the xenon poison effect curves after scram on the conditions that HFETR operates with different power but the same integral power and operates with different power and different integral power is obtained. The results of calculation and study in this paper have been applied to the operation of HFETR successfully.

Key words: Xenon poison effect, Numerical calculation, High flux engineering test reactor(HFETR)

### 0 前 言

当高通量工程试验堆（HFETR）在正常运行过程中遇到断电故障等事件时，反应堆将会紧急停堆。停堆后堆内发生与裂变产物有关的放射性核素的生成和衰变过程，其中一个重要过程是：堆芯内存在的裂变产物  $^{135}\text{I}$  继续衰变成毒物  $^{135}\text{Xe}$ ， $^{135}\text{Xe}$  同时衰变。 $^{135}\text{Xe}$  浓度随时间的变化使堆芯系统的有效中子增殖系数 ( $k_{\text{eff}}$ ) 先减小到最小值，再逐渐增大，从而形成氙毒效应曲线。本文应用数值计算程序对 HFETR 氙毒效应曲线进行理论研究。

### 1 计算方法

#### 1.1 计算程序

本文计算采用 HFETR 专用燃料管理程序

ECP。ECP 程序<sup>[1]</sup>是 HFETR 专用的镶嵌耦合中子扩散程序，同栅元和组件少群参数计算程序 CELL 一起组成 HFETR 的燃料管理程序系统。ECP 程序通过调整临界棒位，可进行燃耗、控制棒效率、倒料和换料等计算，给出每个燃耗步的计算输出，主要包括：注量率和功率分布；功率峰及其位置；相对燃耗分布；有效中子寿期；缓发中子份额；同位素产量；实验回路注量率分布和功率分布。

#### 1.2 程序改进

1.2.1 增加棒位跟踪计算功能 在 HFETR 停堆后，所有控制棒全插到底，不需要调棒计算临界棒位，而是根据堆芯内放射性核素的变化计算堆芯系统相应状态的  $k_{\text{eff}}$ 。在源程序中改变计算结

构,在计算临界棒位模块前添加判断语句,并在ECP的输入文件中增加TRAC选项卡,程序相关的逻辑见表1。

表1 TRAC选项卡逻辑  
Table 1 Options of TRACE Menu

TRAC 值	ECP 燃耗计算执行
-n	第 1-n 步调棒计算, n+1 步及以后棒位跟踪计算
0	调棒计算
n	第 1-n 步棒位跟踪计算, n+1 步及以后调棒计算

注: n 为正整数

1.2.2 扩展燃耗步 扩展前,ECP程序的最大燃耗步只有47步,在源程序文件及其包含文件找到并修改控制燃耗步的变量,将燃耗步限值调大到100步,可以进行HFETR停堆以后精细燃耗步的氙毒效应计算。

## 2 氙毒效应计算分析

ECP程序具有棒位跟踪计算功能后,对某炉次实际装载进行了紧急停堆后的氙毒效应计算分析。首先进行调棒计算,然后使用棒位跟踪计算功能计算HFETR紧急停堆以后堆芯系统的 $k_{eff}$ ,进而计算出HFETR在多种工况下紧急停堆后的氙毒效应,并评价氙毒带来的反应性影响。

### 2.1 全插棒堆芯系统状态的氙毒效应

HFETR紧急停堆时,控制棒全部下插到底。

计算了HFETR在70 MW稳定功率运行到不同燃耗阶段时紧急停堆的氙毒效应曲线(图1)。图2给出了HFETR在不同功率稳定运行30 d后紧急停堆的氙毒效应曲线。图3给出了HFETR运行功率分别为30、60 MW,而运行相同积分功率为600 MW·d后紧急停堆的氙毒效应曲线。

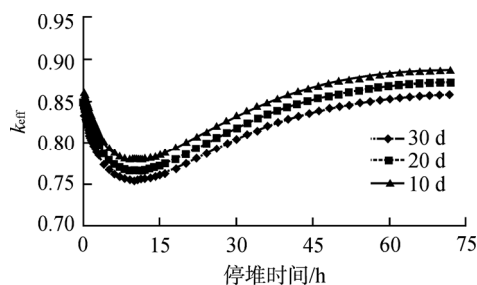


图1 70 MW 稳定功率运行到不同燃耗阶段紧急停堆后堆芯系统的氙毒效应曲线

Fig. 1 Xenon Poison Effect Curves after Scram on Conditions that HFETR Operates at 70 MW with Different Integral Power

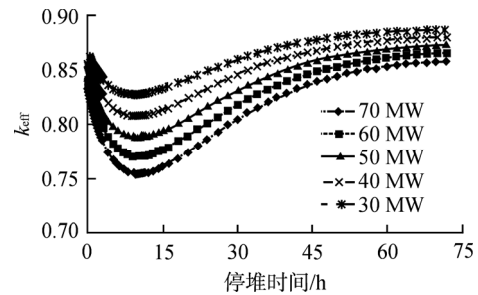


图2 不同功率下稳定运行30 d紧急停堆后堆芯系统的氙毒效应曲线

Fig. 2 Xenon Poison Effect Curves after Scram on Conditions that HFETR Operates for 30 days with Different Power

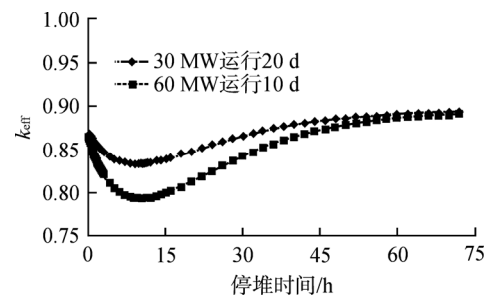


图3 不同功率稳定运行600 MW·d紧急停堆后堆芯系统的氙毒效应曲线

Fig. 3 Xenon Poison Effect Curves after Scram on Conditions that HFETR Operates for 600 MW·d with Different Power

图1给出了紧急停堆后堆芯系统的 $k_{eff}$ 随时间的变化:在停堆时刻,控制棒迅速下插,堆芯系统的 $k_{eff}$ 值从~1瞬降至~0.85;随着 $^{135}\text{Xe}$ 含量的增加再减小至最小值,然后随着 $^{135}\text{Xe}$ 含量的减小而增加。燃耗深度越深,紧急停堆后形成的氙毒效应深度越大,停堆后10.1 h,氙毒效应深度达最大值约-34.5  $\beta_{eff}$ (包括了插棒和氙毒两方面的贡献), $\beta_{eff}$ 为缓发中子有效份额。停堆后约44 h,氙毒含量、堆芯系统的次临界度值恢复与停堆时刻相当。

由图2可知,运行功率越高,相应的氙毒效应对 $k_{eff}$ 的影响越大。

由图3可知,运行功率为60 MW对应的氙毒效应对 $k_{eff}$ 的影响更大。

### 2.2 堆芯系统剩余反应性

相比于2.1节的计算,将控制棒的状态从全插改为全提,从而计算不同运行功率下堆芯系统剩余反应性受氙毒的影响后随时间的变化情况。

图4中,氙毒效应坑曲线前端 $k_{eff}>1$ 的部分

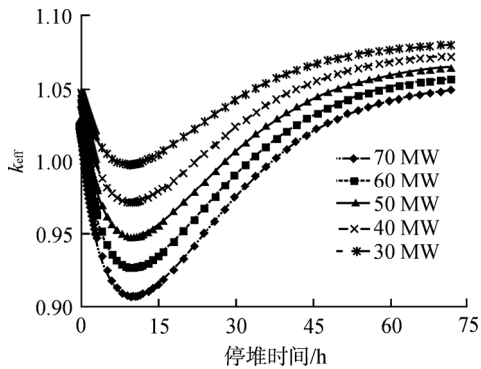


图 4 不同功率运行 30 d 全提棒状态下的氙毒效应曲线

Fig. 4 Xenon Poison Effect Curves after Scram on Conditions that HFETR Operates for 30 Days with Different Power, and all the Control Rods are Lifted to Top Position

是前沿, 后端  $k_{\text{eff}} > 1$  是后沿, 而中间部分  $k_{\text{eff}} < 1$  时剩余反应性小于 0, 表示靠提升控制棒无法启动反应堆, 即反应堆处于强迫停堆状态。由此可知, 反应堆运行功率越小, 紧急停堆后的强迫停堆时间越短, 当功率小于 30 MW, 强迫停堆时间很短甚至可以不考虑。对于 HFETR 在 70 MW 稳定功率运行 30 d 紧急停堆后, 0.5 h 以前、38 h 以后剩余反应性为正值, 堆芯系统相应的  $k_{\text{eff}} > 1$ , 即从理论上说明在反应堆紧急插棒停堆后 0.5 h 之前或约 38 h 后可以靠提升控制棒来重启反应堆, 但实

际操作中要应对氙毒的影响, 造成操作控制棒难度大, 而且也对反应堆控制系统、保护系统等的性能造成压力; 相比较而言, 等到停堆约 44 h 后, 堆芯系统剩余反应性恢复至停堆时刻值且变化缓慢, 这时再重启反应堆, 操作难度小, 相关系统负荷小, 整个启堆过程更安全。

### 3 结束语

本文使用数值方法, 在 HFETR 某炉次原装载方案的基础上做了不同工况下的氙毒效应曲线计算分析, 得到了 HFETR 典型工况的氙毒效应曲线。本文计算研究结果已成功应用到 HFETR 实际运行中, 同时也确保了 HFETR 安全。

#### 致谢:

感谢 ECP 程序作者李大图老师在程序改进方面作出的贡献, 使得本计算研究工作得以实现。

#### 参考文献:

- [1] 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.

(责任编辑: 马 蓉)