

文章编号：0258-0926(2014)S2-0167-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0167

# 高密度乏燃料贮存格架临界安全设计

杨海峰, 霍小东, 易璇, 邵增

中国核电工程有限公司, 北京, 100840

**摘要:** 基于第三代先进非能动压水堆核电厂的设计特点、运行方式及其复杂的燃料组件设计, 考虑各种能谱硬化因素, 研究组件燃耗计算的运行条件组合, 获得指定燃耗深度下的核素密度。建立乏燃料贮存格架的临界计算模型, 并对临界安全分析中的关键因素(如末端效应、可信事故工况等)进行详细研究, 最终初步设计出满足我国最新(临界)标准和要求的、可应用于实际工程的高密度乏燃料贮存格架。

**关键词:** 高密度乏燃料贮存格架; 燃耗信任制; 临界安全设计; 末端效应

**中图分类号:** TP29 **文献标志码:** A

## Criticality Safety Design for High Density Spent Fuel Storage Rack

Yang Haifeng, Huo Xiaodong, Yi Xuan, Shao Zeng

China Nuclear Power Engineering Co., LTD., Beijing, 100840, China

**Abstract:** Based on the design characteristics, operational strategies, as well as the complicated fuel assembly designs, factors leading to a harder neutron spectrum are considered and a combination of operational parameters is identified to obtain the conservative isotopic inventories. Criticality analysis models are built, and factors such as the end effect and the credible accident conditions are studied in detail. Finally, a primary (criticality) design of the high density spent fuel storage rack is developed which meets the most updated (criticality) criteria and can be used in NPP projects.

**Key words:** High density spent fuel storage rack, Burnup credit, Criticality safety, End effect

### 0 前言

在大型商用后处理厂尚未建成的情况下, 采用燃耗信任制技术实现乏燃料密集贮存, 是缓解核电站运行压力的一个可行办法。燃耗信任制技术的应用, 大大增加了临界设计的难度。在组件燃耗计算和贮存格架临界计算分析时, 均需考虑燃料组件辐照历史带来的影响, 以保证计算结果是保守的。

福岛事故后, 国家对新建核电厂的乏燃料贮存设计提高了标准和要求, 特别是 HAD 102/15 《核动力厂燃料装卸和贮存系统设计》中“可溶

性中子吸收剂和燃耗两种信用不应同时应用于相同的贮存区域”的要求。本文以第三代非能动压水堆核电厂为对象, 采用燃耗信任制技术, 初步设计完全满足最新临界安全标准和要求的高密度乏燃料贮存格架。

### 1 程序描述

采用燃耗信任制技术进行乏燃料贮存格架的临界安全设计, 主要包含 2 个部分: 燃料组件的燃耗计算和贮存格架的临界安全分析。使用从美国引进的 ALPHA、PARAGON 程序进行组件燃耗计算。

PARAGON 程序是一个二维多群输运理论的组件计算程序。ALPHA 程序根据用户输入,建立组件模型,调用 PARAGON 程序执行组件燃耗计算。使用从英国引进的蒙特卡罗程序 MONK-9A 进行临界安全分析。

## 2 组件计算模型

在进行组件燃耗计算以获取指定燃耗深度下的核素密度时,应使用硬化的中子能谱,减少  $^{235}\text{U}$  的消耗,增加  $^{238}\text{U}$  到  $^{239}\text{Pu}$  的转换,使用于临界安全分析的核素密度是保守的。

中子能谱主要取决于 2 个因素:慢化剂和中子吸收体。慢化剂的慢化能力越弱,能谱越硬;中子吸收体越多,能谱越硬。中子吸收体包括慢化剂中的可溶硼、燃料棒中的整体型可燃毒物(IFBA)以及导向管中的控制棒等。

第三代非能动压水堆核电站大多采用低泄漏装载模式、18 个月或 16/20 个月交替的平衡循环燃料管理策略<sup>[1]</sup>。燃料组件的最高初始富集度为 4.95%,且包含不同数目的 IFBA 棒,并在活性区轴向两端 20.32 cm 使用 3.20% 富集度的芯块。根据不同燃料管理策略的计算结果,结合乏燃料贮存格架的分析,以 42.6 GW·d/t(U) 的平均燃耗作为初始富集度 4.95% 的乏燃料组件放置于贮存格架 II 区的燃耗限值。

综合考虑各种中子能谱硬化因素,选择初始富集度 5.0% (在 4.95% 的基础上考虑 0.05% 的不确定度) 128 根 IFBA 棒、两端 20.32 cm 为 3.20% 富集度的低富集度区、平均燃耗为 42.6 GW·d/t(U) 的乏燃料组件作为乏燃料贮存格架临界设计的标准组件。在进行燃耗计算时,热功率为 3400 MW,慢化剂温度为 323.37 K 相应的密度为 0.6709 g/cm<sup>3</sup>,硼浓度为 10<sup>-3</sup>,控制棒一直插入。

## 3 临界计算

乏燃料贮存格架的贮存单元有 2 种:单独的套管贮存单元和组合贮存单元。套管贮存单元为不锈钢方管,方管外壁附着含 B<sub>4</sub>C 的铝基中子吸收板(硼铝板),硼铝板外有不锈钢包覆。硼铝板厚度为 0.55 cm,宽度为 21.50 cm。单独的套管贮存单元对角焊接,形成组合贮存单元。贮存单元中心距为 25.00 cm。在计算模型的四周设置周期性边界条件。临界计算时,设置足够的抽样粒

子数与计算代数,保证标准偏差不大于 0.0005。

### 3.1 核素选取

临界分析时考虑主要的铀系核素与裂变产物,忽略强吸收、短寿命的裂变产物以及一些非主要的裂变产物。在冷却过程中, $^{155}\text{Gd}$  的累积以及  $^{241}\text{Pu}$  衰变成  $^{241}\text{Am}$  等,引入的负反应性大于由  $^{239}\text{Np}$  衰变成  $^{239}\text{Pu}$  引入的正反应性。因此,不考虑乏燃料组件的冷却是保守的。

### 3.2 末端效应

在乏燃料贮存系统中,组件顶部的裂变峰对整个系统的有效增殖因子( $k_{\text{eff}}$ )贡献很大。机械补偿模式(MSHIM)导致燃料组件顶部的燃耗更浅,增大了末端效应;另一方面,燃料组件两端使用低富集度芯块,又减小了末端效应。基于第三代非能动压水堆核电站的燃料管理策略,汇编出 MSHIM 模式下的轴向燃耗包络线,卸料组件平均燃耗在 38~46 GW·d/t(U) 区间的包络线如图 1 所示。

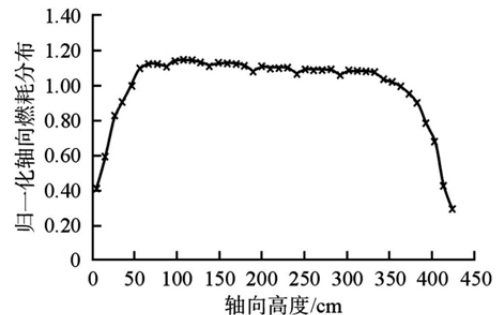


图 1 MSHIM 模式下的轴向燃耗包络线

Fig. 1 Bounding Axial Burnup Profiles under MSHIM Strategy

### 3.3 水密度影响

在临界安全分析中,池水密度变化对系统  $k_{\text{eff}}$  的影响见表 1。由结果可知,在临界计算中用室温下 1.0 g/cm<sup>3</sup> 作为水密度是保守的。

### 3.4 可信事故工况

乏燃料贮存格架 II 区的临界安全分析,须考

表 1 池水密度变化对格架临界安全的影响

Table 1  $k_{\text{eff}}$  of Different Density of Pool Water

水密度/g·cm <sup>-3</sup>	$k_{\text{eff}}$	水密度/g·cm <sup>-3</sup>	$k_{\text{eff}}$
1.0	0.9044	0.2	0.5402
0.9	0.8789	0.01	0.4427
0.8	0.8485	0.005	0.4393
0.6	0.7715	0.001	0.4366
0.4	0.6697	—	—

虑一组不满足燃耗限值的燃料组件误插入的可信事故工况。随着燃耗的增加,易裂变物质的消耗和裂变产物的累积引入负反应性;同时,IFBA的消耗引入正反应性。初始富集度为5.0%、不同IFBA棒数目的燃料组件的反应性随燃耗的变化如图2所示。

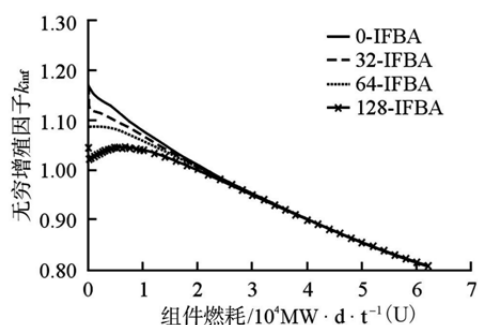


图2 含不同数目IFBA棒的组件 $k_{inf}$ 随燃耗的变化  
Fig. 2 Trend in  $k_{inf}$  of Fuel Assembly of Different IFBA Loading with respect to Burnup

根据堆芯燃料管理策略,初始富集度为4.95%的燃料组件多包含64或128根IFBA棒。因此,在可信事故工况分析时,采用初始富集度为5.0%、32根IFBA棒的燃料组件。误插入事故工况的 $k_{eff}$ 随误插入组件燃耗的变化见表2。

当发生一组组件跌落到贮存格架上方的事故工况时,格架中贮存的组件的活性区距跌落组件至少有50cm的水层,因此,两者间的中子耦合作用可忽略不计,不会影响到临界安全。

当发生一组组件跌落到贮存格架旁边时,考虑跌落的组件与格架外侧的距离变化,计算结果见表3。

表2 误插入事故工况 $k_{eff}$ 计算结果

Table 2  $k_{eff}$  Results of Misloaded Scenario

误插入组件燃耗 /GW·d·t <sup>-1</sup> (U)	初始富集度	初始富集度	初始富集度
	5.0%, 32根 IFBA棒	5.0%, 64根 IFBA棒	5.0%, 128根 IFBA棒
0	0.9195	0.9123	0.9082
1	0.9172	0.9123	0.9073
2	0.9175	0.9142	0.9085
4	0.9170	0.9112	0.9092
6	0.9145	0.9104	0.9095
8	0.9119	0.9117	0.9097
10	0.9130	0.9119	0.9103
12	0.9117	0.9099	0.9095
16	0.9095	0.9099	0.9082
20	0.9084	0.9084	0.9089

表3 贮存格架旁边跌落组件的 $k_{eff}$ 计算结果

Table 3  $k_{eff}$  Results of Dropped Scenario outside Rack

跌落组件与格架 外侧间距/cm	$k_{eff}$	跌落组件与格架 外侧间距/cm	$k_{eff}$
0	0.9073	15	0.9062
2	0.9046	20	0.9052
5	0.9046	25	0.9057
10	0.9043	35	0.9053

## 4 结论

本文建立了贮存格架临界分析模型,对其中的关键因素,如核素选取、末端效应、可信事故工况等进行了详细的研究,最终初步设计出完全满足我国现行法规标准(临界)要求的、可实际应用于工程设计的第三代非能动压水堆核电厂的乏燃料贮存格架。

参考文献:

- [1] 孙汉虹等. 第三代核电技术 AP1000[M]. 北京, 中国电力出版社, 2010.

(责任编辑:张明军)