

文章编号：0258-0926(2014)S2-0164-03; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.S2.0164

乏燃料贮存格架吸收体布置方案 对临界安全的影响研究

赵 均, 韩 嵩, 苏耿华, 石秀安, 蔡德昌

中科华核电技术研究院, 广东深圳, 518026

摘要: 基于燃耗信任制的方法, 采用 APOLLO 和 MCNP5 程序对格架中可溶硼浓度对 k_{eff} 的影响进行研究, 并对中子毒物类型和布置方式对 k_{eff} 的影响进行了分析。结果表明: 格架中可溶硼的浓度变化引起 k_{eff} 变化的速率随着富集度升高而变慢, 近似线性变化。格架内中子毒物间的互相干涉效应是影响其毒物价值的主要原因, 中子毒物价值与硼不锈钢 (BSS) 板间距呈线性关系。根据乏燃料组件外中子能谱的分布改进中子毒物的布置方案, 可以提高乏燃料贮存系统的临界安全性和经济性。

关键词: 燃耗信任制; MCNP5; 临界计算; 中子毒物价值; 硼不锈钢 (BSS)

中图分类号: TP29 **文献标志码:** A

Effect of Neutron Absorber Layout Scheme for Spent Fuel Storage on Critical Safety

Zhao Jun, Han Song, Su Genghua, Shi Xiu'an, Cai Dechang

China Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen, Guangdong, 518026, China;

Abstract: Based on the burn-up credit method, the effect of the soluble boron concentration in the storage on k_{eff} was studied by APOLLO and MCNP5 program. The results showed that the change rate of k_{eff} resulted from the change of the concentration of soluble boron in the storage reduced with the increasing of the fuel enrichment, approximately in linear. Mutual interference effects of the neutron poison in the storage were the main contribution to the absorber value. The neutron poison value has a liner relationship with the distance of the BSS plate. The improved layout scheme of neutron poison in accordance with the energy spectrum distribution of neutron outside the spent fuel assemblies can improve the critical security and economy of the spent fuel storage systems.

Key words: Burn-up credit, MCNP5, Criticality calculation, Neutron poison value, Boron stainless steel (BSS)

0 前 言

随着我国核电的发展, 如何安全而经济地实现乏燃料组件的贮存、转运和处理成为目前国内核电运行面临的重要问题。在传统的乏燃料贮存格架设计中, 采用具有预期最高富集度的新燃料作为分析对象, 该假设简化了临界安全分析的方法, 提高了格架的临界安全性, 却牺牲了乏燃料贮存的经济性。

燃耗信任制是考虑乏燃料在堆内由于辐照导致乏燃料剩余反应性降低的临界安全分析方法。在格架设计中, 采用燃耗信任制可以实现乏燃料组件的密集贮存、提高运输和乏燃料后处理的能力, 从而解决乏燃料贮存的迫切性和经济性问题。

本文应用燃耗信任制技术, 分析了乏燃料贮存格架中可溶硼、中子毒物的材料及其布置方式对反应性的影响, 为核电厂乏燃料贮存格架的设

计提供参考。

1 燃料燃耗计算

1.1 燃耗信任制

乏燃料组件同位素成分计算是燃耗信任临界安全分析技术的核心技术。燃耗信任制技术根据所信任的同位素种类可以分为4种水平^[1]：可裂变水平；钢系核素水平；钢系加裂变产物水平；总可燃吸收体水平。

研究结果表明^[2], 12种钢系元素(^{234}U 、 ^{235}U 、 ^{236}U 、 ^{238}U 、 ^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{241}Pu 、 ^{242}Pu 、 ^{237}Np 、 ^{241}Am 、 ^{243}Am)和15种裂变产物(^{103}Rh 、 ^{133}Cs 、 ^{143}Nd 、 ^{149}Sm 、 ^{152}Sm 、 ^{155}Gd 、 ^{95}Mo 、 ^{99}Tc 、 ^{101}Ru 、 ^{109}Ag 、 ^{145}Nd 、 ^{147}Sm 、 ^{150}Sm 、 ^{151}Sm 、 ^{153}Eu)在所有核素的反应性贡献中大约占了90%的份额。考虑乏燃料组件的中子主要来源于钢系核素,且乏燃料组件的中子能谱主要为易裂变核素的裂变能谱,因此本文采用钢系核素的信任水平。

1.2 燃料燃耗计算

本文基于国内大型压水堆的堆芯运行参数,采用APOLLO2-F程序对初始富集度为4.5%、燃耗为36 GW·d·t⁻¹(U)和初始富集度为5.0%、燃耗为42 GW·d·t⁻¹(U)的2种AFA3GAA新型燃料组件进行燃耗计算,计算得出钢系核素的含量如表1所示。

表1 钢系核素原子密度
Table 1 Actinides Atomic Density

同位素	钢系核素原子密度/10 ²⁴ cm ⁻³	
	富集度 4.5%、燃耗 36 GW·d·t ⁻¹ (U)	富集度 5.0%、燃耗 42 GW·d·t ⁻¹ (U)
^{234}U	5.5205×10^{-6}	5.8817×10^{-6}
^{235}U	3.6927×10^{-4}	3.7720×10^{-4}
^{236}U	1.1313×10^{-4}	1.3072×10^{-4}
^{238}U	2.0883×10^{-2}	2.0692×10^{-2}
^{238}Pu	4.0082×10^{-6}	5.6547×10^{-6}
^{239}Pu	1.4867×10^{-4}	1.5731×10^{-4}
^{240}Pu	4.7684×10^{-5}	5.2388×10^{-5}
^{241}Pu	3.3554×10^{-5}	3.8039×10^{-5}
^{242}Pu	8.7002×10^{-5}	1.0715×10^{-5}
^{237}Np	1.2771×10^{-5}	1.6029×10^{-5}
^{241}Am	8.8794×10^{-6}	1.1316×10^{-6}
^{242}Am	1.4803×10^{-8}	1.9601×10^{-8}
^{243}Am	1.6586×10^{-6}	2.2874×10^{-6}

2 临界安全分析

本文以岭澳核电站二期乏燃料二区贮存格架

(要求的最小可溶硼浓度为 393.3×10^{-6}) 为主要研究对象。采用 MCNP5 程序建立了 7×7 贮存格架的临界安全分析模型, 径向采用全反射边界条件, 格架中心距为 23.8 cm、单块 BSS 中子毒物的厚度为 0.3 cm, 硼不锈钢 (BSS) 板中天然硼的含量保守取 1.7%, 天然硼中 ^{10}B 的同位素丰度取 19.2%。假设在常温常压下, 燃料贮存格架已全部贮存 AFA3GAA 新型燃料组件, 并被慢化剂完全淹没。

2.1 可溶硼对 k_{eff} 的影响

基于以上模型, 计算乏燃料贮存水池的有效增殖因子 (k_{eff}) 随着可溶硼浓度的变化, 当可溶硼浓度在 500×10^{-6} 范围内, 二者呈现出近似二次衰减关系。

对不同富集度 (E) 和燃耗的乏燃料, 反应性 k_{eff} 随硼浓度 (B) 变化关系式可以表示为:

$$k_{\text{eff}} = a \times B^2 + b \times B + c \quad (1)$$

式中, 参数 a 、 b 和 c 是与燃料富集度有关常数, 可通过图 1 的数据按照式 (1) 的方式拟合得到, 参数 a 、 b 和 c 与富集度 E 之间的关系可以表示为:

$$a = -7.21 \times 10^{-7} \times E + 5.73 \times 10^{-8} \quad (2)$$

$$b = -1.907 \times 10^{-3} \times E + 2.456 \times 10^{-4} \quad (3)$$

$$c = 5981 \times E^3 - 772.4 \times E^2 + 38.875 \times E + 0.4672 \quad (4)$$

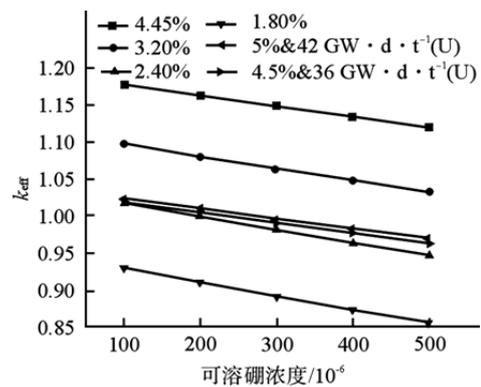


图1 k_{eff} 随着可溶硼浓度的变化

Fig. 1 Changes of k_{eff} with Soluble Boron Concentration

可以看出, k_{eff} 与可溶硼浓度成二次衰减关系, 其衰减的速率与燃料的富集度有关。从式 (2) 可以看出, 由于 a 值很小, 在低可溶硼浓度时, 可认为可溶硼浓度与 k_{eff} 之间近似呈线性关系。

2.2 中子毒物布置方式对 k_{eff} 的影响

2.2.1 中子毒物布置方式 保持单个格架中的

中子毒物的材料总量和格架节距不变：改变 BSS 板的布置方式为双层结构 ($2 \times 0.15 \text{ cm}$)；

将同样数量的 BSS 材料设计成与 CPR1000 机组反应堆控制棒结构类似的部件，分为实心 and 空心 2 种类型，计算结果如表 2 所示。

表 2 k_{eff} 随着吸收体布置方式的变化

Table 2 Changes of k_{eff} with Absorber Arrangement

燃料类型	单板	双板	实心控制棒	空心控制棒
4.45% 新燃料	1.1941	1.1254	1.2379	1.2360
3.10% 新燃料	1.1160	1.0472	1.1943	1.1373
2.40% 新燃料	1.0380	0.9711	1.1012	1.0410
1.80% 新燃料	0.9519	0.8878	0.9999	0.9376
4.5%、36 GW·d·t ⁻¹ (U) 乏燃料	1.0347	0.9730	1.1184	1.0702
5.0%、42 GW·d·t ⁻¹ (U) 乏燃料	1.0392	0.9774	1.1254	1.0785

由表 2 可以看出，格架中 BSS 板的布置方式受燃料中子能谱的影响，对 k_{eff} 的影响较大。随着燃料组件中子能谱的增强该影响效果逐渐加强，格架中 BSS 中子毒物对子中子隔断的作用对 k_{eff} 的影响很大。因此，在设计格架时需要考虑中子的吸收和中子的隔断 2 个作用。

2.2.2 BSS 板布置位置的影响 为了确定 BSS 板在格架内布置位置对中子注量率的干涉效应。分别在单燃料组件和离组件中心 12 cm 处，放置一块厚度为 0.1 cm 的中子毒物的计算模型。随着富集度的升高，热中子注量率分布越远离燃料，对富集度为 4.45% 的燃料组件，目前国内和国际上主流的高密度乏燃料贮存格架的中心距大约为 24 cm，在此范围内中子通量密度的差异约为 6%。而在格架节距 24 cm 的范围内，热中子注量率畸变最大差异约为 80%，最小差异约为 40%。

2.2.3 中子毒物的价值 参考反应堆控制棒价值的定义^[3]，控制棒的价值与其所在处的中子通量密度的平方成正比，因此在格架设计中，中子毒物互相干涉的效应是影响其价值的主要因素。

对中子毒物的布置位置对中子 k_{eff} 的影响进行研究：保持小室节距为 23.8 cm 不变，调整 BSS 板的布置位置（相对于组件中心位置）；保持小室宽度为 22.2 cm 不变，调整小室的中心距。BSS 板距组件中心的距离 L 为 22.2~23.4 cm，小室节距在为 23.4~24.6 cm 变化， k_{eff} 均呈线性变化关系。初始富集度为 5.0%，燃料为 42 GW·d·t⁻¹(U) 的乏燃料，当格架节距不变， L 每增加 0.1 cm，中子毒物的总价值将减小 470×10^{-5} ； L 不变，小室节距每增加 0.2 cm，中子毒物的总价值将增加 633×10^{-5} 。

3 结束语

基于燃料信任值技术对岭澳核电站二期乏池中可溶硼浓度和中子毒物进行研究，结果表明：可溶硼的浓度与反应性变化近似线性关系；格架内中子毒物间的互相干涉效应是影响中子毒物价值的主要原因，中子毒物价值与中子毒物之间的距离呈线性变化关系。节距为 23.8 cm 时，BSS 板间距增加 0.2 cm，其总价值增加 470×10^{-5} ；贮存小室宽度为 24 cm，BSS 板间距增加 0.2 cm，其总价值增加 633×10^{-5} 。

针对采用 BSS 作为中子毒物材料的乏燃料贮存格架，通过调整格架的间距和小室的宽度，并合理的 BSS 板的位置，在保证经济性的前提下，依然可以满足 HAD102/15 中关于事故和正常工况下均不能考虑可溶硼的要求^[4]。

参考文献：

- [1] 攸国顺, 张春明. 燃料信任制分析方法在乏燃料装卸与贮存系统中的应用[J]. 核安全, 2011, 4: 72.
- [2] 刘驰, 蒋校丰, 张少泓. 燃料信任制临界计算中保守性因素研究[J]. 核科学与工程, 2012, 32(2): 98.
- [3] 谢仲生, 吴宏春, 张少泓. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [4] 国家核安全局. 核动力厂燃料装卸和贮存系统设计[S]. HAD 102/15, 2007.

(责任编辑: 杨洁蕾)