

田湾核电站乏燃料水池 采用燃耗信任制的计算研究

夏兆东¹, 周小平¹, 李晓波¹, 吕牛¹, 郑继业^{2, *}

(1. 中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413;

2. 环境保护部 核与辐射安全中心, 北京 100082)

摘要:以田湾核电站(TNPS)2×5排列的贮存格架构成的乏燃料水池为例,研究采用燃耗信任制技术的密集贮存和临界安全问题。采用 MONK9A 程序计算分析不同富集度、不同燃耗的乏燃料装载情况下系统的 k_{eff} 。根据系统 k_{eff} 随不同初始富集度燃料的燃耗变化情况给出了水池的参考装载曲线。采用燃耗信任制技术的密集贮存方案能提高贮存能力 31%。

关键词:燃耗信任制;乏燃料水池;临界安全;装载曲线

中图分类号:TL325

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2013)11-2098-05

doi:10.7538/yzk.2013.47.11.2098

Calculation Study of TNPS Spent Fuel Pool Using Burnup Credit

XIA Zhao-dong¹, ZHOU Xiao-ping¹, LI Xiao-bo¹, LV Niu¹, ZHENG Ji-ye^{2, *}

(1. China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-45, Beijing 102413, China;

2. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China)

Abstract: Exemplified by the spent fuel pool of TNPS which consists of 2×5 fuel storage racks, the spent fuel high-density storage based on burnup credit (BUC) and related criticality safety issues were studied. The MONK9A code was used to analyze k_{eff} of different enrichment fuels at different burnups. A reference loading curve was proposed in accordance with the system k_{eff} 's changing with the burnup of different initially enriched nuclear fuels. The capacity of the spent fuel pool increases by 31% compared with the one that does not consider BUC.

Key words: burnup credit; spent fuel pool; criticality safety; loading curve

燃耗信任制(BUC)是核燃料循环中核临界安全分析研究的重要组成部分。在对核电站乏燃料的临界安全分析(包括乏燃料的贮存、运输、处理和处置)中,通常采用新燃料假设,即假

设乏燃料与新燃料具有相同的核素成分,这就导致了系统的反应性估计值过于保守。燃耗信任制技术是指在乏燃料的贮存、运输、处理、处置等环节中,考虑核燃料经核反应堆辐照后,可

裂变同位素相对净减少,吸收中子的裂变产物和铀系核素大量产生,从而导致乏燃料反应性降低的临界安全分析方法。采用燃耗信任制技术能显著提高乏燃料处理能力,具有巨大的经济效益。

燃耗信任制技术按应用水平可分为4个级别:净可裂变同位素水平 APU-0、铀系核素水平 APU-1、铀系核素加裂变产物水平 APU-2 和全部可燃吸收体水平 APU-M。很多国家已将燃耗信任制技术应用于乏燃料的贮存和运输领域。对于堆乏燃料贮存水池,一般公认地采用 APU-2 级别燃耗信任制,如美国、德国、韩国、西班牙、巴西等;在乏燃料运输领域,目前应用较广泛的是 APU-1 级,如美国、德国、法国、荷兰、瑞士等。

在乏燃料贮存水池中采用燃耗信任制技术能挖掘现有贮存设施的潜力,显著提高乏燃料贮存数量。在我国当前核电事业蓬勃发展的形势下,各核电站乏燃料水池的贮存压力均较大,因此研究采用燃耗信任制技术的乏燃料水池密集贮存方案具有现实意义。为此,针对田湾核电站(TNPS)的六角形燃料组件贮存水池开展燃耗信任制技术的应用研究。

1 研究对象

1.1 燃料组件

田湾核电站采用俄罗斯设计的六角形燃料组件,含有311根燃料棒、18个控制棒导向管、1个中心管和1个中子温度测量管共331个栅元,不同于国内其他核电站采用的方形燃料组件。燃料组件的详细描述参见文献[1]。

乏燃料核素成分的计算采用从西屋公司引进的针对 VVER 核电站开发的 APA-H 程序中组件能谱与燃耗计算程序 PHOENIX-H 完成。

1.2 乏燃料贮存水池

田湾核电站的乏燃料贮存水池由若干长方形贮存格架构成,每个贮存格架由六角形硼钢管和相应的金属结构构成的贮存槽位组成,每个贮存槽位能垂直放置1盒乏燃料组件,1个贮存格架包含67个乏燃料贮存槽位。由于目前掌握的电厂实际的贮存水池的参数不全,因此,本文的计算研究仅针对 2×5 排列的贮存格

架构成的模拟水池模型展开,整个贮存水池能容纳670盒乏燃料组件。

2 采用新燃料假设的乏燃料水池临界安全分析

2.1 分析模型

分析对象是 2×5 排列的贮存格架构成的水池,贮存格架的基本参数列于表1。分析计算时考虑水池充满纯水,不考虑水中硼的吸收,水密度取 1 g/cm^3 ,对于临界安全分析是保守的。水池四周及其上下各设置30 cm水反射层。

表1 贮存格架的基本参数

Table 1 Basic parameters of storage rack

参数	数值
贮存槽位数目	67
贮存槽位中心距,mm	300
贮存槽位对边距,mm	266
硼钢厚度,mm	5
硼的质量分数,%	2.5
贮存格架围板厚度,mm	10
乏燃料水池外围板厚度,mm	50

在计算中,所有燃料按照新燃料考虑,所有燃料组件中的中子毒物全部不考虑,混合型燃料组件统一按照高富集度考虑,上述假设条件是保守的。燃料组件按照真实几何结构描述。

2.2 临界安全分析

根据上述新燃料假设的计算模型,采用 MONK9A 程序^[2] 计算分析乏燃料水池装载不同富集度燃料情况下系统的 k_{eff} ,计算结果列于表2。

表2 不同富集度燃料装载的系统 k_{eff}

Table 2 System k_{eff} of fuel loading for different enrichments

富集度/%	k_{eff}	σ
1.6	0.704 7	4.0×10^{-4}
2.0	0.755 5	4.0×10^{-4}
2.4	0.796 8	4.0×10^{-4}
3.0	0.841 1	4.0×10^{-4}
3.6	0.875 5	4.0×10^{-4}
4.1	0.899 0	4.0×10^{-4}
4.5	0.913 6	4.0×10^{-4}
5.0	0.931 4	4.0×10^{-4}

临界安全准则要求:乏燃料水池在满装载最高可接受富集度燃料组件时,考虑各种不确定性因素情况下,正常和可信事故工况下的 $k_{\text{eff}} \leq 0.95$ 。本文的计算目的是对比采用燃耗信任制后贮存水池的容量提升,因此本文不考虑可信事故分析和不确定性分析内容。为了留有足够的保守裕量,假设所有不确定性的总和为0.015(不包括蒙特卡罗计算的统计不确定度),因此,乏燃料水池 k_{eff} 的计算限值为 $k_{\text{limit}}^{\text{cal}} = 0.935$,即 $k_{\text{eff}}^{\text{cal}} + 2\sigma \leq 0.935$ 。从计算结果可看出,新燃料假设条件下,乏燃料水池满装载5.0%富集度的乏燃料时,系统最大 $k_{\text{eff}}^{\text{cal}} + 2\sigma = 0.9322$,小于安全限值,符合临界安全要求。

3 采用燃耗信任制技术的乏燃料水池临界安全分析

3.1 分析模型

分析对象为 2×5 排列的贮存格架构成的水池,其中充满纯水,不考虑水中硼的吸收,水池四周及其上下各设置30 cm水反射层。乏燃料水池和贮存格架的外形尺寸参数不变。具体参数列于表3。

表3 采用燃耗信任制技术的密集贮存格架基本参数

参数	数值
贮存槽位中心距,mm	260
贮存槽位对边距,mm	256
硼钢厚度,mm	5
硼的质量分数,%	2.5
贮存格架围板厚度,mm	10
乏燃料水池外围板厚度,mm	50

由于采用了燃耗信任制技术,贮存格架内部的贮存槽位可更加密集地排列,如图1所示。原有单个贮存格架含有67个贮存槽位,采用燃耗信任制后,单个贮存格架含有88个贮存槽位。

燃料组件按照真实几何结构描述,但需考虑燃料燃耗不同导致的核素成分的不同。计算中,考虑全寿期满功率运行,慢化剂温度取出口温度,冷却剂硼浓度取1 000 ppm,冷却时间

取0,不考虑Xe,计算的 ^{239}Np 浓度加到 ^{239}Pu 浓度上,所有这些假设条件皆使得乏燃料反应性计算结果偏大,对于临界安全分析是保守的。采用钢系加裂变产物级别的燃耗信任制,考虑的核素种类包括钢系核素13种和裂变产物14种(表4)。

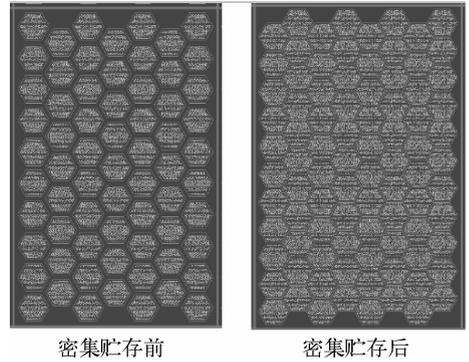


图1 乏燃料贮存格架模型密集贮存前后对比

Fig. 1 Comparison of storage rack model before and after high-density storage

表4 燃耗信任制计算中考虑的核素

Table 4 Nuclides chosen for BUC calculation

钢系核素	裂变产物	钢系核素	裂变产物
^{234}U	^{95}Mo	^{241}Pu	^{147}Pm
^{235}U	^{99}Tc	^{242}Pu	^{147}Sm
^{236}U	^{103}Rh	^{237}Np	^{149}Sm
^{238}U	^{109}Ag	^{241}Am	^{150}Sm
^{238}Pu	^{133}Cs	^{243}Am	^{151}Sm
^{239}Pu	^{143}Nd	^{244}Cm	^{152}Sm
^{240}Pu	^{145}Nd		^{153}Eu

3.2 临界安全分析

根据上述计算模型,分别计算乏燃料水池装载不同初始富集度及不同燃耗水平的乏燃料情况下系统的 k_{eff} ,计算结果列于表5,MONK9A程序计算的统计不确定度 $\sigma = 3.0 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4}$ 。

从表5可看出,在装载不同初始富集度乏燃料情况下水池系统的 k_{eff} 均随燃耗增加而减小。从临界安全角度考虑,对于不同初始富集度的乏燃料必须限定允许装载的最低燃耗,以确保系统 k_{eff} 不超过安全限值,这样的装载准则可用装载曲线来表示。

表 5 采用燃耗信任制技术后不同富集度燃料装载下的系统 k_{eff}
 Table 5 System k_{eff} of fuel loading for different enrichments using BUC

燃耗/ ($\text{GW} \cdot \text{d} \cdot \text{tU}^{-1}$)	不同初始富集度下的 k_{eff}							
	1.6%	2.0%	2.4%	3.0%	3.6%	4.1%	4.5%	5.0%
0	0.823 3	0.886 4	0.934 1	0.990 5	1.031 4	1.059 9	1.079 7	1.100 6
5	0.795 6	0.848 3	0.892 0	0.944 5	0.986 5	1.015 1	1.034 4	1.055 8
10	0.767 2	0.814 5	0.856 1	0.908 9	0.951 6	0.981 4	1.001 9	1.023 7
15	0.741 3	0.784 1	0.825 2	0.876 5	0.920 3	0.950 6	0.971 6	0.995 8
20	0.720 1	0.758 6	0.796 0	0.846 3	0.890 2	0.921 8	0.943 4	0.968 2
25	0.701 7	0.735 5	0.769 3	0.819 0	0.862 4	0.893 5	0.917 4	0.942 4
30	0.687 4	0.715 1	0.746 2	0.791 9	0.835 4	0.867 9	0.891 8	0.917 6
35	0.673 6	0.697 7	0.725 5	0.768 4	0.809 9	0.842 0	0.866 0	0.894 0
40	0.663 2	0.683 7	0.707 5	0.744 8	0.785 9	0.817 7	0.841 6	0.868 4
45	0.655 6	0.671 2	0.691 2	0.725 5	0.763 7	0.794 6	0.817 7	0.845 5

3.3 装载曲线

采用燃耗信任制技术并不降低系统的临界安全裕量,因此,适用同样的临界安全准则,即乏燃料水池在满装载最高可接受富集度燃料组件时,考虑各种不确定性因素情况下,正常和可信事故工况下的 $k_{\text{eff}} \leq 0.95$ 。

燃耗信任制技术涉及的不确定性分析内容更多,本文的计算研究不涉及不确定性分析内容,为了留有足够的保守裕量,假设所有不确定性的总和为 0.05,因此,乏燃料水池 k_{eff} 的计算限值为 $k_{\text{limit}}^{\text{cal}} = 0.90$ 。

考虑端部效应对系统反应性的影响,采用文献[3]中给出的不同燃耗范围内乏燃料的轴向燃耗包络分布(表 6)计算轴向分段燃耗的系统 k_{eff} 。表 6 所列的轴向包络燃耗分布是经过文献[3]研究确定的能在不同燃耗段包络该段燃耗乏燃料的反应性效应的轴向燃耗分布,对于不同燃耗段的乏燃料采用不同的轴向燃耗包络分布。

在不同燃耗点分别按照均匀燃耗和表 6 所列轴向分段燃耗计算系统 k_{eff} ,两者取最大值作为该点的 k_{eff} 计算值。然后利用乏燃料不同燃耗下系统 k_{eff} 计算值可插值得到 $k_{\text{limit}}^{\text{cal}} = 0.90$ 时各初始富集度燃料的燃耗值(表 7)。将燃耗值与初始富集度拟合成二次多项式并经保守处理可得到该水池系统的装载曲线,如图 2 所示。保守处理的原因是二次多项式拟合可能导致某

些点的多项式计算值与插值燃耗存在负偏差,为保证保守性,拟合出来的二次多项式后面再加上 1 项,即所有多项式计算燃耗值与插值燃耗值的最大负偏差,本文为 $1.64 \text{ GW} \cdot \text{d}/\text{tU}$,处理后的二次多项式计算燃耗值总是大于等于插值燃耗值,更加保守。

表 6 不同燃耗范围乏燃料的轴向燃耗包络分布
 Table 6 Bounding axial profiles
 by group spent fuel for different burnups

轴向高度/%	不同燃耗($\text{GW} \cdot \text{d} \cdot \text{tU}^{-1}$)的轴向燃耗包络分布		
	<18	18~30	>30
2.78	0.649	0.668	0.652
8.33	1.044	1.034	0.967
13.89	1.208	1.150	1.074
19.44	1.215	1.094	1.103
25.00	1.214	1.053	1.108
30.56	1.208	1.048	1.106
36.11	1.197	1.064	1.102
41.69	1.189	1.095	1.097
47.22	1.188	1.121	1.094
52.78	1.192	1.135	1.094
58.33	1.195	1.140	1.095
63.89	1.190	1.138	1.096
69.44	1.156	1.130	1.095
75.00	1.022	1.106	1.086
80.56	0.756	1.049	1.059
86.11	0.614	0.933	0.971
91.67	0.481	0.669	0.738
97.22	0.284	0.373	0.462

表7 不同初始富集度燃料装载
 $k_{\text{eff}}=0.90$ 时对应的燃耗

Table 7 Fuel burnup of different
initial enrichments ($k_{\text{eff}}=0.90$)

富集度/%	燃耗/(GW·d·tU ⁻¹)
1.6	—
2.0	—
2.4	4.05
3.0	14.15
3.6	18.87
4.1	25.67
4.5	29.16
5.0	35.23

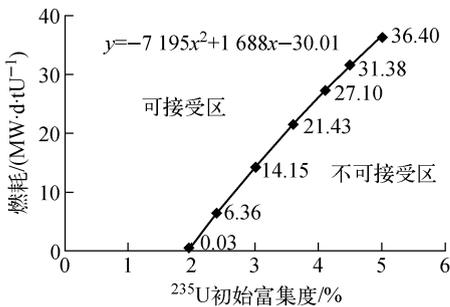


图2 装载曲线

Fig. 2 Loading curve

根据装载曲线搜索计算,得到能装载的新燃料的最大富集度约为 1.9%。由此可知,初始富集度在 1.9% 以下的燃料可不受燃耗限制地装载;初始富集度在 1.9% 以上的燃料必须按照装载曲线要求的最低燃耗限值装载,燃耗水平高于最低燃耗的乏燃料可装载,否则不允许装载。

3.4 优势分析

采用燃耗信任制技术不降低系统临界安全裕量,即不突破系统 k_{eff} 小于 0.95 的临界安全

准则,它只是减少了分析计算过程的保守程度,使得计算分析更加精确地反映系统的真实 k_{eff} 。

采用燃耗信任制技术可显著提高乏燃料水池的贮存能力,以本文计算分析对象为例,总的乏燃料贮存量从 670 盒增加到 880 盒,贮存能力提升 31%。

4 结论

针对田湾核电站 2×5 排列的贮存格架构成的乏燃料水池开展采用燃耗信任制技术的密集贮存和临界安全分析研究。研究结果如下。

1) 在装载不同初始富集度乏燃料情况下,贮存水池系统的 k_{eff} 均随燃料燃耗增加而减小。

2) 从临界安全角度考虑,初始富集度在 1.9% 以下的燃料可不受燃耗限制地装载;初始富集度在 1.9% 以上的燃料必须按照装载曲线要求的最低燃耗限值装载。采用燃耗信任制技术不降低临界安全裕量,只是减少了分析计算过程的保守程度。

3) 采用燃耗信任制技术可显著提高乏燃料水池的贮存能力,以本文计算分析对象为例,总的乏燃料贮存量从 670 盒增加到 880 盒,贮存能力提升 31%。

参考文献:

- [1] 李友谊,杨晓强. 田湾核电站堆芯燃料管理简介 [C]//第十三届反应堆数值计算与粒子输运学术会议. 西安:反应堆物理数值计算与粒子输运专业委员会,2010.
- [2] ANSWERS Software Service. MONK9A user guide for version 9, MONK/REPORT/005[R]. Dorset: ANSWERS Software Service, 2001.
- [3] WAGNER J C, DEHART M D. Review of axial burnup distribution considerations for burnup credit calculations, ORNL/TM-1999/246 [R]. US: ORNL, 2000.