

SPRR-300 堆生物屏蔽层活化情况调查

夏文友, 黄宪果*, 苏容波, 曾俊辉, 李涛文, 吴中义

(中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要:反应堆生物屏蔽层是反应堆退役阶段的重要源项之一。通过建立计算模型, 使用 MCNP 和 ORIGEN2 程序计算获得了 SPRR-300 堆生物屏蔽层的活化情况。为校核理论计算结果, 对 SPRR-300 堆生物屏蔽层混凝土进行了取样分析。取样分析结果与理论计算结果较为一致, 证明了理论计算模型的准确性。通过对取样分析结果进行拟合, 获得了 SPRR-300 堆生物屏蔽层针对 ^{60}Co 核素的活化厚度, 即 1.1 m 高度处的活化厚度为 840 mm, 1.5 m 高度处的活化厚度为 680 mm。

关键词:活化产物; 生物屏蔽层; 反应堆

中图分类号: TL943

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2014)S0-0758-05

doi: 10. 7538/yzk. 2014. 48. S0. 0758

Activated Products Distribution Survey in Biological Shield of SPRR-300 Reactor

XIA Wen-you, HUANG Xian-guo*, SU Rong-bo, ZENG Jun-hui,

LI Tao-wen, WU Zhong-yi

(China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Biological shield is one of the most important source items in a reactor. The activated products distribution in biological shield of SPRR-300 reactor was obtained by using MCNP and ORIGEN2 program to set up calculation model. Some concrete samples from biological shield of SPRR-300 reactor were analyzed. The analysis results show a good agreement with calculation result, which proves that the calculation model is accurate. The activated thickness for ^{60}Co in biological shield is confirmed through the fitting of analysis results, which is 840 mm in 1.1 m height position and 680 mm in 1.5 m height position.

Key words: activated product; biological shield; reactor

反应堆生物屏蔽层主要用于屏蔽来自反应堆的中子和 γ 射线, 降低反应堆大厅剂量水平, 一般采用高密度重混凝土浇灌而成。在反应堆运行期间, 生物屏蔽层长期处于较高通量的热

中子环境中, 活化程度高, 主要活化核素包括 ^{60}Co 、 ^{152}Eu 、 ^{54}Mn 等。生物屏蔽层是反应堆退役阶段的重要活化源项之一, 掌握其活化情况将为反应堆退役实施提供基础源项数据, 获得

收稿日期: 2014-05-30; 修回日期: 2014-08-08

作者简介: 夏文友(1987—), 男(苗族), 湖南怀化人, 研究实习员, 辐射防护专业

* 通信作者: 黄宪果, E-mail: hxg32@163.com

其活化厚度数据将有利于反应堆退役废物最小化的实现^[1-2]。

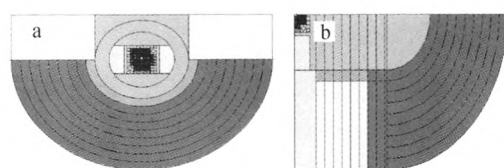
SPRR-300 堆是一座轻水冷却、轻水慢化的池式研究堆,使用²³⁵U 浓缩度为 10% 的 UO_2 作为核燃料,目前该堆处于停堆待退役阶段。该堆经过长时间的运行,堆内各部件及生物屏蔽层活化程度高,在退役前必须对其活化情况进行调查。

根据距离活性区的远近,SPRR-300 堆生物屏蔽层使用密度分别为 5.2、4.5、3.0、2.3 t/m^3 的重混凝土浇灌而成。生物屏蔽层总高度为 7.5 m,厚度 1.8 m。生物屏蔽层构筑物结构成分复杂,混凝土内贯穿有水平孔道、斜孔道、热柱等构筑物。为确定 SPRR-300 堆生物屏蔽层的活化情况,本文拟采用 MCNP 和 ORIGEN2 程序对其进行理论计算,并对生物屏蔽层混凝土活化情况进行实验测定,以校核理论计算结果。

1 理论计算

采用 MCNP 和 ORIGEN2 程序对生物屏蔽层活化情况进行模拟计算^[3-4]。模拟计算中将生物屏蔽层中子注量率计算模型分为两部分:堆芯西侧和东侧。

因堆芯及生物屏蔽层结构具有对称性,可认为西侧半环区域内以堆芯中心位置竖直线为轴呈轴对称分布,即同一水平面的半圆环线上中子注量率相同。计算生物屏蔽层内中子注量率分布时仅需考虑生物屏蔽层径向和轴向。南北两侧方形生物屏蔽层相对于堆芯同样对称,建立计算模型时仅考虑一侧。东侧生物屏蔽层和西侧生物屏蔽层物理建模相同,采取分层处理的方法,越远离堆芯,栅元的重要性越大。计算模型如图 1 所示。西侧生物屏蔽层中子注量率计算结果示于图 2。由图 2 可计算得到 2011



a——西侧计算模型,b——东侧和南侧计算模型

图 1 生物屏蔽层计算模型

Fig. 1 Calculation model for biological shield

年 4 月生物屏蔽层内放射性核素总活度为 4.14×10^{10} Bq。

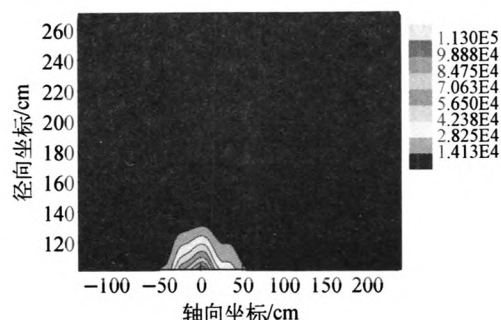


图 2 西侧生物屏蔽层中子注量率分布

Fig. 2 Neutron fluence rate distribution of east biological shield

2 实验校核

2.1 取样

为确定生物屏蔽层的活化情况,对理论计算进行校核,需获取不同密度、距活性区不同距离处的样品,并对其进行分析测量。根据 SPRR-300 堆生物屏蔽层混凝土密度分布、样品的代表性、取样数量、现场条件及作业人员的辐射防护等要求,确定在堆本体 1.1、1.5、2.0、3.1 m 高度 4 个位置处钻孔取样,为避免破坏堆池结构,取样时从外表面向活性区方向水平打孔至深 1.5 m 处,取样布点如图 3 所示。

生物屏蔽层采用钻石打孔机进行取样,先

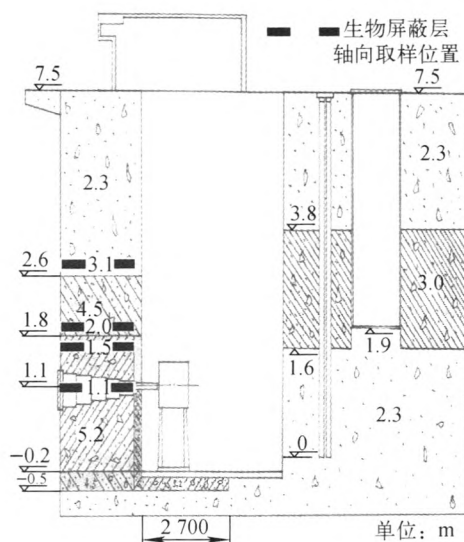


图 3 生物屏蔽层取样高度位置分布

Fig. 3 Sampling height of biological shield

用钻石打孔机采用 $\phi 300\text{ mm}$ 的钻头进行深度 (与屏蔽层外壁的距离) 约 100 mm 的混凝土钻削, 以判断生物屏蔽层内水平钢筋的布筋位置, 查明其布筋位置后, 选定没有水平钢筋的位置为取样位置, 采用 $\phi 50\sim 100\text{ mm}$ 的空心钻头进行取样操作。取样过程为: 先钻削一段生物屏蔽墙, 取出打孔机钻头, 用特制专用扁铲插入钻头位置, 将芯体从侧面斩断, 取出扁铲, 再用钻头将混凝土样套出。套出后, 再将钻头伸入, 加上延长杆进行第二级混凝土样的取样操作, 直至所取样符合要求为止。

取出混凝土样品后, 用混凝土切片机对样品进行切片, 获得按堆水池径向距离进行分类的样品, 若取出的柱状样品内有钢筋, 则剥离出钢筋。将切片获得的混凝土样品和剥离出的钢筋样品处理为符合实验室测量要求的样品, 装入已标识的样品盒, 并记录该样品轴向标高位置和径向 (离活性区中心点的水平距离) 距离尺寸, 送至实验室进行分析测量。

在钻孔取样过程中, 对不同深度进行 γ 剂量率测量, 钻孔取样过程及混凝土生物屏蔽获取的生物屏蔽层样品外观如图 4 所示, 样品为水泥和铸铁块的混合。



图 4 生物屏蔽层取样过程及样品外观
Fig. 4 Sampling process and sample of biological shield

2.2 测量

将样品进行处理后装入样品盒, 使用 Inspector 1000 手持式核素识别仪对样品表面剂量率水平、核素种类进行初步判定, 根据表面剂量率水平选择合适的测量距离, 防止测量死时间过长。测量仪器选用 CANBERRA 公司生产的 BE5030 宽能无源效率刻度高纯锗探测器, 仪器经国家二级计量检定站检定合格, 采用 LabSOCS 无源效率刻度软件对谱仪进行效率刻度。LabSOCS 无源效率刻度软件的准确度可溯源到美国国家计量局 (NIST)。

3 结果与讨论

3.1 样品测量结果

表 1 列出不同高度、不同深度处所取样品

表 1 生物屏蔽层样品分析测量结果
Table 1 Analysis results of biological shield sample

取样 高度/ mm	取样 深度/ mm	^{60}Co 比活度/ ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	^{152}Eu 比活度/ ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	^{54}Mn 比活度/ ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	取样 高度/ mm	取样 深度/ mm	^{60}Co 比活度/ ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	^{152}Eu 比活度/ ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	^{54}Mn 比活度/ ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)
1 100	505	—	—	—	2 000	1 000	—	—	—
	800	0.022	—	0.001		1 100	—	—	—
	998	0.142	0.006	0.002		1 200	0.016	—	—
	1 100	0.758	0.058	0.007		1 300	0.032	—	—
	1 200	7.616	0.349	0.030		1 400	0.419	—	—
	1 320	11.763	0.589	0.143		1 500	0.329	0.208 1	—
	1 410	24.32	0.972	0.283	3 100	1 000	—	—	—
	1 520	110.9	4.420	0.985		1 100	—	—	—
1 500	520	—	—	—		1 200	—	—	—
	1 010	0.024	0.001	—		1 300	—	—	—
	1 202	0.715	0.041	0.012		1 400	—	—	—
	1 310	2.433	0.125	0.038		1 500	—	—	—
	1 405	11.011	1.055	0.146					
	1 450	22.368	2.242	0.308					
	1 510	57.547	4.233	0.787					

的测量结果。由表 1 数据可看出,除⁶⁰Co外,其余核素的比活度均不高,测量结果统计涨落误差较大,因此本文的分析讨论均以⁶⁰Co 核素为准。1.1、1.5、2.0 m 高度处⁶⁰Co 的比活度随屏蔽层深度的变化情况如图 5 所示。从图 5 可看出,同一取样高度处⁶⁰Co 的比活度随着与生物屏蔽层外壁距离的增加(距离堆芯活性区中心越近)而升高,即同一高度处⁶⁰Co 比活度随着与堆芯中心位置距离的增加而降低。

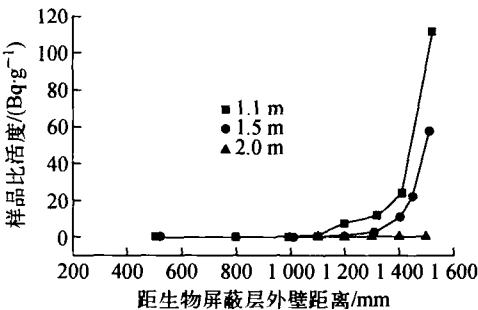


图 5 活化产物⁶⁰Co 比活度随取样深度的变化
Fig. 5 Specific activity distribution
of ⁶⁰Co vs. sampling depth

3.2 与模拟计算结果的比较

将取样测量获得的活化数据与相同位置模

拟计算结果进行比较,结果列于表 2。表 2 数据表明,距离堆芯越近,测量值与计算值吻合越好,这主要是由两个方面原因造成的:1) 离堆芯中子源越远,中子注量率越低,计算的收敛性越差;2) 离堆芯中子源越远,材料活化程度越低,在使用 γ 谱仪在进行低水平活度测量时带来的测量不确定度较大,导致理论值与测量值出现偏差。

3.3 生物屏蔽层活化厚度的确定

对取样测量获得的数据进行拟合,拟合结果如图 6 所示。从图 6 拟合结果可看出,1.1 m 高度处⁶⁰Co 比活度与距生物屏蔽层外壁距离之间满足式(1)指数函数关系,拟合相关系数为 0.973;1.5 m 高度处⁶⁰Co 比活度与距生物屏蔽层外壁距离之间满足式(2)指数函数关系,拟合相关系数为 0.996。

$$y = 1 \times 10^{-6} e^{0.012x} \tag{1}$$

$$y = 5 \times 10^{-9} e^{0.015x} \tag{2}$$

对于⁶⁰Co 核素,IAEA RS-G-1.7 报告^[5]中规定固体废物无条件清洁解控的管理目标值为 0.1 Bq/g。因此,将生物屏蔽层内⁶⁰Co 比活度高于 0.1 Bq/g 的区域作为活化区,该区域内混凝土将作为放射性废物进行管理。将含⁶⁰Co 固体废物无条件清洁解控的管理目标值 0.1 Bq/g

表 2 生物屏蔽层⁶⁰Co 活度的测量值与计算值比较
Table 2 Comparison between analysis results and calculation results

高度/ mm	取样深度/ mm	比活度测量值/ (Bq · g ⁻¹)	测量时间	比活度计算值/ (Bq · g ⁻¹)	计算时间
1 100	505	—	2011-06-18	0.08	2011-04-24
	800	0.022	2011-06-18	1.21	2011-04-24
	998	0.14	2011-06-19	3.9	2011-04-24
	1 100	0.76	2012-01-06	4.5	2011-04-24
	1 200	7.6	2012-01-06	8.6	2011-04-24
	1 320	11.76	2011-07-17	14.2	2011-04-24
	1 410	24.32	2011-07-18	22.7	2011-04-24
	1 520	110.9	2011-07-18	62.9	2011-04-24
	1 500	—	2011-06-08	0.34	2011-04-24
1 500	520	—	2011-06-08	0.34	2011-04-24
	1 010	0.024	2011-06-09	2.98	2011-04-24
	1 202	0.71	2011-06-10	4.44	2011-04-24
	1 310	2.43	2011-06-12	6.76	2011-04-24
	1 405	11.0	2011-06-13	8.27	2011-04-24
	1 450	22.4	2011-06-14	9.12	2011-04-24
	1 510	57.5	2011-06-15	18.7	2011-04-24

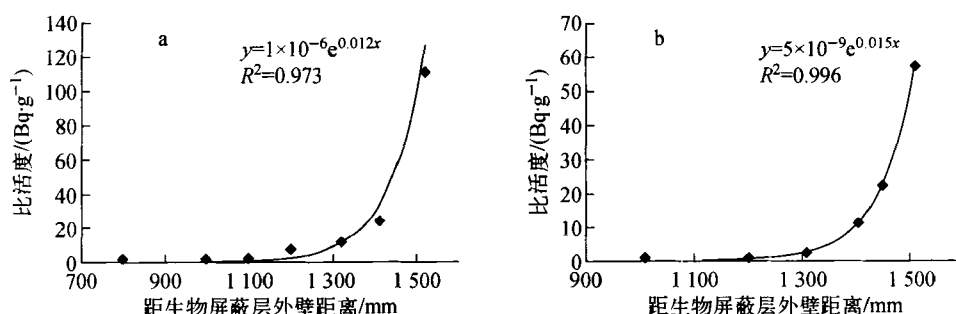


图6 1.1 m(a)及1.5 m(b)处的拟合结果

Fig. 6 Fitting results of 1.1 m (a) and 1.5 m (b)

分别带入式(1)、(2),计算得到1.1 m高度处针对 ^{60}Co 的活化厚度为840 mm,1.5 m高度处针对 ^{60}Co 的活化厚度为680 mm。

4 结论

对SPRR-300堆生物屏蔽层的活化情况进行了调查,采用MCNP和ORIGEN2程序对活化情况进行了理论计算,并对生物屏蔽层进行了取样测量,以校核理论计算结果。分析对比显示,理论计算结果与取样测量结果一致性较好,证明了理论计算建模的准确性。通过计算获得了SPRR-300堆生物屏蔽层针对 ^{60}Co 核素的活化厚度:1.1 m高度处为840 mm;1.5 m高度处为680 mm。

参考文献:

- [1] 丁丽,李睿之,周一东,等. 101重水研究堆安全关闭过渡期放射性源项调查[J]. 原子能科学技术,2012,46(6):716-720.
DING Li, LI Ruizhi, ZHOU Yidong, et al. Radiological characterization survey during transition phase of safe shutdown of 101 HWRR[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2012, 46(6): 716-720(in Chinese).
- [2] 林晓玲,杜得福,陈迎锋. 某反应堆放射性存留量实验测定[J]. 辐射防护,2010,30(4):232-235.
LIN Xiaoling, DU Defu, CHEN Yingfeng. Experimental determination of radioactive remaining amount in certain reactor[J]. Radiation Protection, 2010, 30(4): 232-235(in Chinese).
- [3] 窦海峰,代君龙,杨锐,等. SPRR-300反应堆混凝土屏蔽层内中子注量率分布研究[J]. 核电子学与探测技术,2007,27(2):399-401.
DOU Haifeng, DAI Junlong, YANG Rui, et al. Study on neutron flux distribution in concrete shielding of the SPRR-300 reactor[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007, 27(2): 399-401(in Chinese).
- [4] STEFAN M, MILE D, MARIO V, et al. Neutron flux measurements at the TRIGA reactor in Vienna for the prediction of the activation of the biological shield[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2011, 69: 1 621-1 624.
- [5] IAEA. Application of the concepts of exclusion, exemption and clearance, RS-G-1.7[R]. Vienna: IAEA, 2004.