

中国实验快堆中的 ^{238}U 裂变反应率测量实验研究

陈效先, 范振东, 王 勇, 赵金坤, 陈晓亮, 胡定胜, 赵郁森

(中国原子能科学研究院 中国实验快堆工程部, 北京 102413)

摘要: 由于 ^{238}U 裂变反应率在中国实验快堆(CEFR)中是一个非常关键的指标参数, 因此, 在 CEFR 的首次物理启动工作中对其进行了实验测量。在实验过程中, 利用高贫化的 UO_2 (^{235}U -0.002%) 直接进行了 ^{238}U 裂变反应率的绝对测量; 利用国产贫铀片 (^{235}U -0.335%)、高浓铀片 (^{235}U -90%) 组合方式间接进行了 ^{238}U 裂变反应率的测量。给出两种方法与理论值的对比和轴向及径向的相对分布。本实验为 ^{238}U 裂变反应率测量提出一新的选择方案, 并验证了其可靠性。

关键词: 中国实验快堆; 裂变反应率; 富集度

中图分类号: TL326

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)S0-0120-03

doi: 10. 7538/yzk. 2013. 47. S0. 0120

Measurement Experimental Research of ^{238}U Fission Reaction Rate In China Experimental Fast Reactor

CHEN Xiao-xian, FAN Zhen-dong, WANG Yong, ZHAO Jin-kun,

CHEN Xiao-liang, HU Ding-sheng, ZHAO Yu-shen

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-34, Beijing 102413, China)

Abstract: China Experimental Fast Reactor (CEFR) is the first fast reactor in China. It experimented on CEFR to measure the ^{238}U fission reaction rate in the first physics start-up tests because of its fundamentality. The experiment was composed of the absolute measurement by the high poor uranium (^{235}U -0.002%) and the indirect measurement by the national poor uranium (^{235}U -0.335%) and the high enrichment uranium (^{235}U -90%). The axial distribution and the radial distribution were given and compared with the theoretical value. The reliability was proved and a new way was found to measure the ^{238}U fission reaction rate.

Key words: China Experimental Fast Reactor; fission reaction rate; enrichment

较为常用的 ^{238}U 裂变反应率测量是利用涂敷高纯度 ^{238}U 裂变电离室直接测量^[1-2], 但由于中国实验快堆(CEFR)上没有实验孔道, 所以采用组件入堆辐照方式对 CEFR 上的裂变反

应率进行测量。因此, 在 ^{238}U 裂变反应率的测量实验中采用箔片活化法^[3], 即将几种不同富集度铀探测片放入功率稳定的反应堆内辐照一定时间并冷却后, 分别测量其裂变产物的特征 γ 射

线,从而推出²³⁸U 裂变反应率。本工作将对两种不同方法测量²³⁸U 裂变反应率进行比较。

1 实验方法

在快堆中²³⁸U 和²³⁵U 均发生裂变反应,其裂变产物相同,因此,测量²³⁸U 裂变反应率时需考虑²³⁵U 富集度带来的影响^[4]。实验组件分别在反应堆内以下位置(图 1)进行了²³⁸U 的裂变率轴向分布实验与径向分布实验。轴向分布取在 2-2 位置处,其中有 13 个间隔不一的测量点;径向分布分别取在 2-2、3-3、4-3、5-3、6-4、7-5、9-6、11-8 等 8 个位置上。铀探测箔片分别采用高浓铀片(²³⁵U -90%)和国产贫铀片(²³⁵U -0.335%)组合测量、(²³⁵U -0.002%)的进口贫铀球直接测量两种测量方法对²³⁸U 裂变反应率测量。

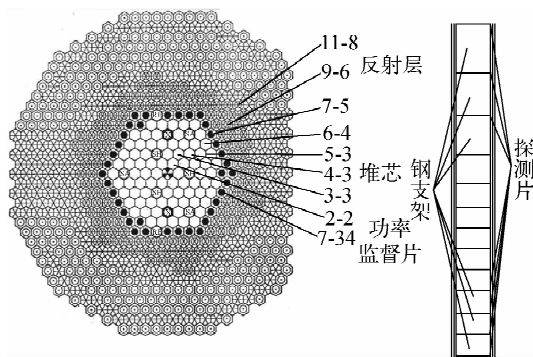


图 1 堆芯位置分布

Fig.1 Core location distribution

实验采用组件入堆方式,需将装载探测箔片的专用燃料实验组件替换堆内的燃料组件,

在某一稳定功率下照射数小时后快速停堆。拔出专用燃料实验组件并转运至堆外,抽出位于该组件中心的辐照装置(含探测器导管),去钠、清洗、解体,从辐照装置取出探测箔片并依次放入标有序号的样品转运盘内。等待一定时间后,逐个将箔片放在位于高纯锗 γ 探头上方某一距离的样品托盘内,测量样品内诱发活性,获取感兴趣光电峰内计数。

2 ²³⁸U 裂变率的测量

实验分别采取了高浓铀片和国产贫铀片组合测量(即 C 系列)、进口贫铀球直接测量(即 E 系列)两种不同方式,辐照位置和辐照时间均相同,但 C 系列和 E 系列的辐照功率稍有不同。C 系列是将高浓铀片和贫铀片同时放入堆内,在某功率下辐照 2 h;出堆等待一定时间后分别测量裂变产物¹⁰³Ru 的 497 keV γ 射线,并对测量中的衰减进行修正,金属铀探测箔片中¹⁰³Ru 活度 A 的计算公式为:

$$A = \frac{C\lambda}{I_{\gamma}\epsilon K(1-\tau)(1-e^{-\lambda t_m})} \quad (1)$$

式中:C 为光电峰的净计数;I_γ 为¹⁰³Ru 的 497 keV γ 射线的绝对强度(分支比);ε 为谱仪测量 497 keV γ 射线的光电峰效率;K 为样品中能量为 497 keV 的 γ 射线的自吸收修正系数;t_m 为铀箔片活性的测量时间间隔,s;τ 为测量样品活性时系统的死时间;λ 为¹⁰³Ru 的衰变常量。

裂变产物中的¹⁰³Ru 主要由裂变产物¹⁰³Tc 衰变形成,衰变关系示于图 2。

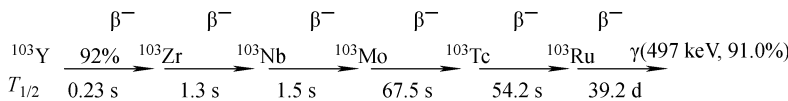


图 2 ¹⁰³Ru 的衰变关系

Fig.2 Decay relation of ¹⁰³Ru

则金属铀探测箔片¹⁰³Ru 的活度 A 为:

$$A = \Phi(\sigma_5 N_5 Y_5 + \sigma_8 N_8 Y_8)(1 - e^{-\lambda_s})e^{-\lambda_w} \quad (2)$$

式中:Φ 为辐照通量;σ 为²³⁵U 或²³⁸U 微观裂变截面;N 为探测片中²³⁵U 或²³⁸U 的核数目;Y 为²³⁵U 或²³⁸U 裂变产生¹⁰³Ru 的产额;t_w 为等待时间(辐照结束到测量开始时间),s;t_s 为

辐照时间,s;下角 5 和 8 对应²³⁵U 和²³⁸U。

²³⁸U 单核裂变率 R_{f,8} 为:

$$R_{f,8} = \Phi\sigma_8 \quad (3)$$

而 E 系列是将进口贫铀球放入堆内在一定功率下辐照相同时间,则金属铀探测箔片裂变产物¹⁰³Ru 的活度 A 为:

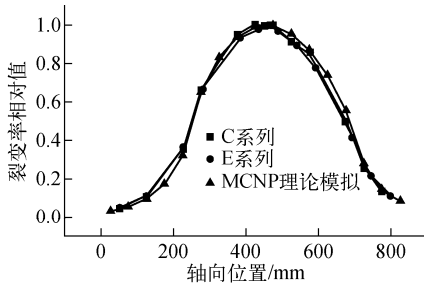
$$A = \Phi(\sigma_8 N_8 Y_8)(1 - e^{-\lambda_s})e^{-\lambda_w} \quad (4)$$

将式(1)代入式(4)得:

$$\Phi_8 = \frac{C\lambda e^{\lambda_w}}{I_{\gamma} \epsilon K (1 - \tau)(1 - e^{-\lambda_m}) N_8 Y_8 (1 - e^{-\lambda_s})} \quad (5)$$

3 结果与分析

根据公式得出 C 系列和 E 系列的²³⁸U 裂变反应率的轴向相对分布与径向相对分布(图 3),并和理论值进行比较,可知,轴向由于



贫铀球与贫铀片包裹的厚度不同,从而导致 E 系列与 C 系列的探测片位置越靠后相差越大,但分布曲线与理论值符合良好。

对于²³⁸U 裂变反应率绝对测量,由于 C 系列和 E 系列功率不同,将其均归一到 40% 额定功率并和理论值进行了对比(图 4)。可知,在轴向中心位置差别最大,E 系列与理论相对偏差最大值为 5.7%,C 系列与理论相对偏差最大值为 19.97%;C 系列与 E 系列相对偏差最大值为 15.1%。

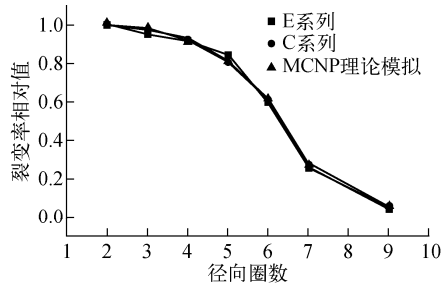


图 3 C 系列与 E 系列²³⁸U 裂变率轴向及径向分布

Fig. 3 Axial distribution and radial distribution of ²³⁸U fission reaction rate in C series and E series

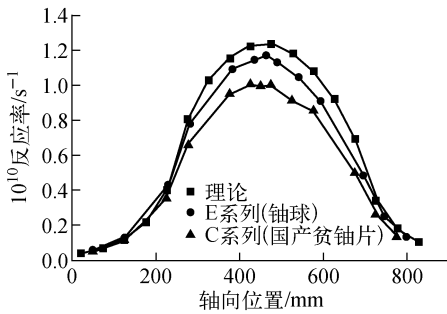


图 4 40% 功率下 C 系列、E 系列与理论²³⁸U 裂变反应率

Fig. 4 ²³⁸U fission reaction rate in C series, E series and calculated value on 40% rated power

4 结论

实验结果表明,利用国产贫铀片与高浓铀片组合测量²³⁸U 裂变反应率是完全可行的,在轴向分布和径向分布均可取得较好的结果,本实验为²³⁸U 裂变反应率测量提出一新的选择方案,并验证了其可靠性。

而在绝对测量中,推算到 40% 功率下轴向中间位置相对偏差较大,但亦在 20% 内。本实验的误差主要来自 3 个方面:1) 本实验探测片

数目较多,未进行相同位置重复照射,能谱测量一般为 3 次,每次峰面积达 10 000 即可,统计误差还有待降低;2) 实验的核心是相同位置下辐照时间和中子通量不变,但实际上中子通量出现较小波动,且在低功率辐照时,功率无法精确测量;3) 理论计算用的能谱与真实谱有一定差异,尤其在堆芯中心位置处,从而导致 C 系列堆芯中心处与理论差异较大。

参考文献:

- [1] 胡大璞,郑福裕. 核反应堆物理实验方法[M]. 北京:原子能出版社,1988:35-45.
- [2] 钟文发,徐小琳. 铀箔测量²³⁸U 裂变率的修正研究[J]. 清华大学学报:自然科学版,1995,35(3):84-86. ZHONG Wenfa, XU Xiaolin. Study on correction of ²³⁸U fission rates measured using uranium foils [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1995, 35(3): 84-86(in Chinese).
- [3] 罗璋琳,史永谦,潘泽飞. 实验反应堆物理[M]. 北京:原子能出版社,2011:60-65.
- [4] 胡定胜. ²³⁵U 和²³⁸U 裂变率分布测量应考虑的因素[M]//中国实验快堆年报. 北京:原子能出版社,2005:100-105.