

文章编号: 0258-0926(2014)01-0178-03

高通量工程试验堆 ^{14}C 生产估算

刘水清, 孙 宇, 马立勇, 杨 斌

中国核动力研究设计院, 成都, 610041

摘要: 通过计算热中子利用率来估算靶件对堆芯反应性的影响, 同时使用燃料管理程序进行校算。估算结果表明, 堆芯 80 盒元件可装氮化铝靶料 4000 g, 对反应性的影响约为 -250×10^{-5} , 使堆芯寿期缩短约 60 MW·d; ^{14}C 的年产量可达 1.0×10^{12} Bq。高通量工程试验堆 (HFETR) 的堆芯核设计和运行结果表明, 该估算是正确、合理的。

关键词: ^{14}C ; 氮化铝; 生产; 估算; 高通量工程试验堆

中图分类号: TL411⁺.3, TL92⁺1 文献标志码: A

0 前 言

高通量工程试验堆 (HFETR) 是一座大型的用于科研和工程应用的压力壳型反应堆, 中子注量率高^[1], 其堆芯采用规则六角形栅元的三角点阵布置, 布置灵活且紧凑; 燃料组件采用多层套管结构, 每盒燃料组件、铍组件、铝组件、钴靶件等均占据一个栅元。堆芯装载约 80 盒燃料元件, 每盒元件中心可有一个 $\phi 12$ mm 的辐照孔道。目前 ^{14}C 是具有广泛市场和经济效益的同位素。HFETR 的高中子注量率具备生产 ^{14}C 的有利条件, 为了对 HFETR 采用氮化铝靶生产 ^{14}C 的堆芯进行核设计, 本文估算了氮化铝靶件入堆辐照生产 ^{14}C 对堆芯反应性的影响以及 ^{14}C 的生产量。

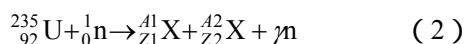
1 ^{14}C 生产量估算分析

1.1 氮化铝靶件对堆芯反应性的影响

^{14}C 是由反应堆中子与 ^{14}N 反应而来, 故采用氮化铝靶件生产 ^{14}C 。 ^{14}N 的反应截面为 1.9×10^{-28} m²^[2], ^{14}N 的半衰期为 5730 a。反应式为:



^{235}U 裂变一般表示为:



式中, ${}^{A1}_{Z1}\text{X}$ 、 ${}^{A2}_{Z2}\text{X}$ 为中等质量数的裂变碎片; γ 为每次裂变放出的中子数。

根据理论分析, 氮化铝靶件入堆辐照生产 ^{14}C

对堆芯反应性的影响可以通过比较热中子利用系数进行分析。热中子利用系数是指被燃料吸收的热中子数占被芯部中所有物质 (包括燃料在内) 吸收的热中子总数的份额。

假设无限堆芯只由元件和氮化铝组成, 借用热中子利用系数概念, 定义氮化铝靶件热中子利用系数为被氮化铝吸收的热中子数占被堆芯所有物质 (包括燃料在内) 吸收的热中子总数的份额。

假设每盒元件中孔氮化铝靶装料 50 g, 堆芯有 80 盒元件, 则可装氮化铝靶料 4000 g, 可以计算出氮化铝靶件对反应性的影响 Δk 为:

$$\Delta k = - \frac{\frac{W_N N_A \sigma_N}{A_N}}{\frac{W_N N_A \sigma_N}{A_N} + \frac{W_U N_A \sigma_U}{A_U}} \quad (3)$$

式中, W_U 、 W_N 分别为堆芯 ^{235}U 和 ^{14}N 的质量, kg; σ_U 、 σ_N 分别为 ^{235}U 和 ^{14}N 的反应截面, 10^{-28} m²; A_U 、 A_N 分别为 ^{235}U 和 ^{14}N 的摩尔质量, kg·mol⁻¹; N_A 为阿伏伽德罗常数。

由式 (3) 可计算出氮化铝靶件对反应性的影响 Δk 为 250×10^{-5} 。该反应性变化使堆芯寿期缩短约 60 MW·d。

1.2 ^{14}C 生产量

目前, HFETR 使用的燃料管理程序 ECP 是一个三维 xyz 坐标细网格堆芯燃料管理计算程序, 用

细网有限差分方法求解中子扩散方程，然后采用粗网格再平衡方法加速迭代收敛。ECP程序需要CELL程序等提供堆芯各材料的微观参数，而CELL程序对材料采用均匀化方法计算，无法将氮化铝靶件的生成核区分开来，因此ECP程序不能对氮化铝靶件倒料进行计算，ECP程序的数据库要求所有燃料元件都有某种靶件或都没有靶件。但 ^{14}C 生产时不会80盒元件都装入氮化铝靶件，因此，不能采用ECP程序进行 ^{14}C 产量计算。

但是，若进行没有倒料的单炉次计算，只需将带有氮化铝靶件的新燃料元件作为一种新材料即可。先采用CELL程序计算出燃料元件中带有氮化铝靶件的新燃料元件的截面参数。参数计算时，假设堆芯有80盒元件，每盒元件 $\phi 12\text{ mm}$ 中孔氮化铝靶件装料50 g；然后用ECP程序计算出HFETR堆芯装载氮化铝靶件对堆芯反应性的影响约为 -260×10^{-6} ，使堆芯寿命缩短约65 MW·d。

同样条件估算其反应性影响 Δk 约为 -250×10^{-6} ，与ECP程序计算结果 -260×10^{-6} 偏差4.0%，证明估算结果是正确、合理的。

首先由二群中子扩散方程求出中子注量率 $\varphi^{[2]}$ ：

$$-\nabla \cdot D_g \nabla \varphi_g(\mathbf{r}) + \Sigma_{r,g} \varphi_g(\mathbf{r}) = \begin{cases} [\gamma \Sigma_{f,1} \varphi_1(\mathbf{r}) + \gamma \Sigma_{f,2} \varphi_2(\mathbf{r})] / k_{\text{eff}} & g=1 \\ \Sigma_{s,1 \rightarrow 2} \varphi_1(\mathbf{r}) & g=2 \end{cases} \quad (4)$$

式中， $g=1, 2$ 分别表示快群和热群； \mathbf{r} 为位置坐标； D 为群扩散系数； φ 为中子注量率， $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ； Σ_r 、 Σ_f 分别为群吸收、裂变宏观截面， m^{-1} ； $\Sigma_{s,1 \rightarrow 2}$ 表示由快群散射到热群的宏观截面， m^{-1} 。

再由式(5)求出 ^{14}C 的比活度 S_n ：

$$S_n = I \cdot \frac{N_A}{W} \cdot 0.693 T_C^{-1} \cdot \frac{\varphi \sigma_N}{\frac{0.693}{T_C} - \varphi \sigma_N} \times \left[\exp(-\varphi \sigma_N t) - \exp\left(-\frac{0.693}{T_C} t\right) \right] \quad (5)$$

式中， I 为 ^{14}N 同位素丰度； W 为靶件摩尔质量， $\text{kg} \cdot \text{mol}^{-1}$ ； T_C 为 ^{14}C 半衰期， s ； t 为辐照时间， s 。

将HFETR元件区平均热群中子注量率 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、运行寿期2000 MW·d对应的辐照时间 $2.304 \times 10^6 \text{ s}$ 代入式(5)可计算出 ^{14}C 的比活度：

$$S_n = 3.8 \times 10^{10} \text{ Bq/kg} \quad (7)$$

如果堆芯元件中孔装氮化铝靶料4000 g，每炉段运行2000 MW·d寿期， ^{14}C 的炉产量为 $1.5 \times 10^{11} \text{ Bq}$ ，如果年运行7炉段，年产量可达 $1.0 \times 10^{12} \text{ Bq}$ 。

现HFETR堆芯装有氮化铝靶件20盒，它们对反应性的影响估算约为 -62×10^{-5} ，氮化铝靶件入堆的堆芯核设计和运行结果与估算相一致，表明氮化铝靶件入堆对堆芯的其他特性参数如元件功率不利因子、临界棒位、寿期等影响很小。

2 结束语

氮化铝靶件入堆辐照会对反应堆寿期带来一定的影响，影响的大小可以采用本文的方法进行估算。从HFETR氮化铝靶件入堆的堆芯核设计和运行结果表明：已入堆的20盒氮化铝靶对反应性的影响估算为 -62×10^{-5} ，对堆芯的其他特性参数如元件功率不利因子、临界棒位等影响很小，与HFETR实际运行结果一致。若HFETR燃料元件中孔全部布置靶件， ^{14}C 的年产量可达 $1.0 \times 10^{12} \text{ Bq}$ ，具有可观的经济效益。

本文的估算方法适用于其他靶件入堆辐照时对堆芯影响的估算。

参考文献：

- [1] 张守纲, 曹志坚. 用HFETR生产高比活度放射性同位素[C]. HFETR运行十年论文集, 成都: 四川科学技术出版社, 1990.
- [2] 谢仲生, 吴宏春, 张少泓. 核反应堆物理分析: 修订版[M]. 北京: 原子能出版社, 2004.

Estimation of Carbon-14 Production in HFETR

Liu Shuiqing, Sun Yu, Ma Liyong, Yang Bin

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: The core reactivity change from AlN targets and ^{14}C producing rate is estimated by calculating the using distribution of reactor neutron, while the fuel management code of HFETR is used to contrast with the estimation calculation. The calculation result shows that it causes about 250×10^{-5} reduction of reactivity and core life will be cut down about 65 MW·d when all the 80 fuel assembly center holes are filled with 4000 gram AlN targets, while 1.0×10^{12} Bq ^{14}C could be produced per year. The estimation results accord well with HFETR reactor core design and operation status.

Key words: ^{14}C , AlN, Production, Estimation, HFETR

作者简介:

刘水清(1966—),男,研究员。1992年毕业于中国核动力研究设计院反应堆工程与安全专业,获硕士学位。现从事反应堆堆芯物理设计研究工作。

孙宇(1980—),男,助理研究员。2003年毕业于哈尔滨工程大学核工程与核技术专业,获学士学位。现从事反应堆运行技术管理研究工作。

马立勇(1982—),男,助理研究员。2009年毕业于北京大学粒子物理与原子核物理专业,获硕士学位。现从事反应堆堆芯物理设计研究工作。

(责任编辑:马蓉)