

文章编号: 0258-0926(2014)02-0207-04; doi: 10.13832/j.jnpe. 2014. S2. 0207

压水堆主回路裂变产物源项计算程序开发

徐治龙, 吴晓春, 万海霞, 李 龙, 邵 静, 刘黎丽, 张 京

中国原子能科学研究院, 北京, 102413

摘要: 为了开发拥有自主知识产权的核电厂主回路源项计算程序, 对裂变产物的生成、释放和迁移等各个过程进行深入研究, 建立和完善各个过程的计算模型, 形成了一套完整的压水堆主回路裂变产物源项计算方法, 在此基础上开发了主回路裂变产物源项计算程序, 并进行了初步验证。

关键词: 压水堆; 主回路; 裂变产物; 放射性源项

中图分类号: TL3; TL929 文献标志码: A

Development of Calculation Code for Fission Product in PWR Primary Loop

Xu Zhilong, Wu Xiaochun, Wan Haixia, Li Long, Shao Jing, Liu Lili, Zhang Jing

China Institute of Atomic Energy, Beijing, 102413, China

Abstract: In order to develop the calculation code with the intellectual property right for the source term of Fission Product in Primary Loop (FPPL), the generation, release and migration of FPPL is studied, and the calculation model for each of the above processes has been developed, and a complete set of calculation method for FPPL has been established. Based on this, a calculation code for FPPL has been developed and validated.

Key words: PWR, Primary loop, Fission product, Radioactive source

0 引言

对主回路系统内的源项进行计算分析, 开发拥有自主知识产权的主回路源项计算程序, 对我国的核电设计自主化具有重要意义。裂变产物是主回路内的重要源项, 本文主要针对压水堆主回路中的裂变产物源项的生成、释放和迁移等过程进行深入研究, 建立各个过程的计算模型和计算方法, 并进行程序开发和初步验证。

1 数学建模

反应堆正常运行时, 大部分裂变产物都保持在燃料芯块内, 部分裂变产物会进入芯块与包壳之间的气隙。包壳一旦发生破损, 包壳间隙内的裂变产物就会进入到主回路中, 成为主回路源项

的一部分。另外, 在燃料元件生产过程中包壳表面沾污的少量沾污铀也会释放裂变产物。因此, 在计算主回路的裂变产物源项时, 裂变产物从生成到在主回路内迁移和分布可以分为以下 5 个过程^[1]: 裂变产物生成; 进入包壳间隙; 破损释放; 沾污铀释放; 主回路迁移。

1.1 裂变产物生成

要计算主回路内的裂变产物, 需要先计算元件内裂变产物的积存量。反应堆运行不同时间燃料芯块内裂变产物的积存量可以使用传统方法或现有的燃耗计算程序进行计算, 不再详细赘述。

1.2 裂变产物进入包壳间隙

绝大多数裂变产物生成后会保留在燃料芯块内, 只有一小部分易挥发或气态元素的会脱离燃

收稿日期: 2014-10-29; 修回日期: 2014-11-27

作者简介: 徐治龙(1980—), 男, 副研究员。现从事反应堆源项与辐射屏蔽设计与研究

料芯块进入包壳间隙。裂变产物进入包壳间隙的释放速率或释放份额可参考文献进行计算。

如果燃料元件没有发生破损，气态裂变产物将在包壳间隙内聚集，包壳间隙内积存的裂变产物随时间的变化为：

$$\frac{dN_{ii}}{dt} = R_i - (\lambda_i + \sigma_i \varphi) N_{ii} \quad (1)$$

式中， N_{ii} 为包壳间隙内裂变产物 i 的总核子个数； t 为反应堆运行时间； R_i 为裂变产物进入包壳间隙的速率； λ_i 为裂变产物 i 的衰变常数； σ_i 为裂变产物 i 的微观中子吸收截面； φ 为中子注量率。

由式 (1) 可得，没有破损的情况下， t 时刻包壳间隙内裂变产物 i 的核子数 N_{ii0} 。

1.3 裂变产物进入冷却剂

在燃料元件包壳破损后，包壳间隙内的裂变产物会释放到冷却剂中去。在计算裂变产物从燃料包壳间隙释放到冷却剂时，可以假设裂变产物在包壳间隙中的体积浓度与沉淀在间隙壁上的面积浓度之间存在平衡关系。根据该平衡关系可以得出包壳间隙内裂变产物气态原子数 N_{gi} 与总原子数 N_{ii} 之间的关系为：

$$N_{gi} = \frac{V_g}{V_g + \alpha_i S_m} N_{ii} \quad (2)$$

式中， V_g 为包壳间隙体积； S_m 为包壳间隙内表面积； α_i 为吸附常数。

定义包壳间隙内单个气态裂变产物原子在单位时间内释放到冷却剂中的概率为 v_g 。那么单位时间内，裂变产物 i 从包壳间隙释放到冷却剂中的原子个数 $R_{gap,i}$ 可以表示为：

$$R_{gap,i} = v_g N_{gi} \quad (3)$$

考虑裂变产物的衰变和中子俘获，在燃料元件破损后，包壳间隙内裂变产物 i 的核子数随时间变化的关系式为：

$$\frac{dN_{ii}}{dt} = R_i - \left[\frac{v_g V_g}{V_g + \alpha_i S_m} + (\lambda_i + \sigma_i \varphi) \right] N_{ii} \quad (4)$$

结合边界条件，破损时刻 $t=0$ ， $N_{ii}(0)=N_{ii0}$ 。解方程得，包壳破损后 t 时刻包壳间隙内裂变产物 i 的核子数为：

$$N_{ii}(t) = \frac{R_i}{\mu_{Ti}} (1 - e^{-\mu_{Ti} t}) + N_{ii0} e^{-\mu_{Ti} t} \quad (5)$$

$$\mu_{Ti} = \frac{v_g V_g}{V_g + \alpha_i S_m} + \lambda_i + \sigma_i \varphi \quad (6)$$

1.4 沾污铀释放

沾污铀是主回路中裂变产物的另一个重要来源。计算沾污铀释放的裂变产物要考虑燃料的损耗。沾污铀释放的裂变产物可以分为两部分：

水中悬浮的铀和钚生成的裂变产物，这些裂变产物会 100% 释放到冷却剂中；沉积在辐照区的沾污铀产生的裂变产物，由于沉积厚度很薄，这些裂变产物有 50% 通过反冲释放到冷却剂中^[1]。根据该方法可以计算出沾污铀释放裂变产物的速率 R_{zi} 。

1.5 裂变产物在主回路内的分布

计算裂变产物在主回路中的分布，首先要计算裂变产物在主回路中的总量。根据主回路中裂变产物的增加和消失，可建立主回路中裂变产物随时间变化的关系式为：

$$\frac{dN_i}{dt} = R_{gap,i} + R_{zi} + S_1 + S_2 - \mu_{Ti} N_i \quad (7)$$

式中 N_i 为 t 时刻裂变产物 i 在主回路中的核子数； μ_{Ti} 为主回路中裂变产物 i 的总消失率； S_1 为衰变生成项； S_2 为中子俘获生成项。

由式 (7) 可得燃料元件破损后主回路中裂变产物的核子数。然后，可以进一步计算裂变产物在主回路中的分布。根据冷却剂流经主回路各个系统、设备的顺序，建立串联模块化计算模型，如图 1 所示，假定模块 1 为堆芯。



图 1 串联计算模型示意图
Fig. 1 Series Wound Model

根据各模块中核素浓度的增加和减少项以及各模块之间核素浓度关系建立方程组：

$$\left(C_{ni} + \frac{R_{gap,i} + R_{zi} + S_{2i}}{Q} + S_{1i} \right) (1 - \eta_{ni}) = C_{li} \quad (8-1)$$

$$(C_{li} + S_{12i})(1 - \eta_{2i}) = C_{2i} \quad (8-2)$$

$$(C_{n-1i} + S_{1ni})$$

$$\dots$$

$$(1 - \eta_{ni}) = C_{ni} \quad (8-n)$$

式中， C_{ni} 为第 n 个模块出口核素 i 的体积浓度； S_{2i} 为俘获中子生成核素 i 的速率； S_{1ni} 为衰变生成核素 i 的速率； Q 为模块的冷却剂流量； η_{ni} 为核素 i 经过第 n 个模块后的消失份额。

通过求解该方程组可以得到各个模块内的核素浓度。

2 模块化计算模型

在建立计算模型时，可以把主回路中的系统定义成若干独立的模块，使计算模型模块化。为了便于数学描述，可将模块参数统一用系统消失率 μ 和模块消失份额 η 来表示。系统消失率 μ 的物理意义为单位时间内由某因素引起的核素减少量占主回路内核素总量的份额，模块消失份额 η 的物理意义为核素流过某个模块时，在该模块内的消失份额。

2.1 衰变

整个主回路内衰变引起的裂变产物消失率即为衰变常数：

$$\mu_\lambda = \lambda \quad (9)$$

假定冷却剂流过模块的时间为 t ，则裂变产物流过模块时的衰变消失份额 η_λ 为：

$$\eta_\lambda = 1 - e^{-\lambda t} \quad (10)$$

2.2 中子俘获

中子俘获反应只发生在堆芯区域，假定核素在整个回路内浓度是均匀的，则在整个回路中由于中子俘获引起的核素的消失率为：

$$\mu_\sigma = r\sigma\phi\beta \quad (11)$$

式中， r 为冷却剂流过堆芯的时间与循环一周的时间之比； β 为核素在主回路水中的溶解或悬浮份额。

冷却剂流过堆芯的时间非常短，中子俘获在堆芯模块引起的消失份额 η_σ 可近似表示为：

$$\eta_\sigma = 1 - e^{-\sigma\phi t} \approx \sigma\phi t \quad (12)$$

2.3 泄漏

假设某模块的冷却剂泄漏流量为 q_l ，则该模块内由于泄漏引起的消失份额 η_l 为：

$$\eta_l = \frac{q_l}{Q} \quad (13)$$

若主回路冷却剂总体积为 V_t ，则由冷却剂泄漏引起的核素在整个回路中的消失率 μ_l 为：

$$\mu_l = \frac{\beta q_l}{V_t} \quad (14)$$

冷却剂泄漏的参数计算方法也适合于其他一些冷却剂总量发生变化的情况。

2.4 净化

冷却剂净化系统一般是并联在主回路上，如

图 2 所示。若设备的净化效率为 ε ，净化流量为 q_f ，则净化消失率 μ_f 为：

$$\mu_f = \frac{\beta q_f \varepsilon}{V_t} \quad (15)$$

模块的净化消失份额 η_f 为：

$$\eta_f = \frac{q_f \varepsilon}{Q} \quad (16)$$



图 2 净化模块示意图
Fig. 2 Module for Purify

2.5 模块串并联

模块串联情况下，核素在主回路系统内总的消失率为各种消失率之和：

$$\mu_t = \mu_\lambda + \mu_\sigma + \mu_l + \mu_f + \dots \quad (17)$$

将两个模块串联起来时（图 3a），新模块的消失份额 η_t 可按式（18）计算：

$$\eta_t = 1 - (1 - \eta_a)(1 - \eta_b) \quad (18)$$

若将两个模块并联时（图 3b），新模块的消失份额 η_t 可按式（19）计算：

$$\eta_t = \frac{q_a \eta_a + q_b \eta_b}{q_a + q_b} \quad (19)$$

式中， η_a 为 a 模块的消失份额； η_b 为 b 模块的消失份额； q_a 为模块 a 的流量； q_b 为模块 b 的流量。

若计算模型中有多个模块串并联时，可以按照上面的计算方法依次类推，从而实现建立更为复杂的主回路计算模型。使用统一的模块参数，在计算模型中增加或减少模块不会改变微分方程和方程组的结构形式，因此可以灵活的建立各种主回路计算模型。

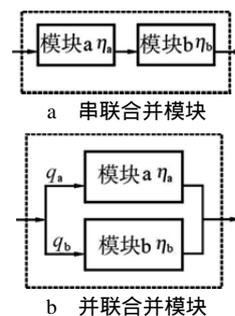


图 3 串并联模块的合并
Fig. 3 Modules in Series or Parallel

3 程序开发和验证

在以上研究的基础上用 VB 语言对程序进行了开发,并对某核电厂的主回路裂变产物源项进行了初步计算验证,主要计算输入数据如表 1 所示。部分核素在冷却剂中的比活度计算结果对比情况见表 2。计算结果表明最大计算误差为 6%,

表 1 计算输入
Table 1 Input Date

参数名称	数值
燃料比功率/MW·t ⁻¹ (U)	36.2
堆芯 U 装量/t	127.78
燃料/GW·d·t ⁻¹	5~70
逃脱系数	取自文献[2]
燃料元件破损率/%	0.25

表 2 计算结果对比
Table 1 Result Comparison

核素	主回路核素浓度/Bq·t ⁻¹		误差/%
	计算值	对比值	
⁸⁸ Kr	2.73×10 ¹⁰	2.70×10 ¹⁰	1.11
¹³³ Xe	2.14×10 ¹¹	2.20×10 ¹¹	2.73
¹³¹ I	1.46×10 ¹⁰	1.50×10 ¹⁰	2.67
¹³⁷ Cs	1.88×10 ¹⁰	2.00×10 ¹⁰	6.00
⁸⁹ S	1.56×10 ⁷	1.60×10 ⁷	2.50

程序的计算精度可以满足使用要求。

4 结论

通过对裂变产物的生成、释放和迁移等各个过程进行深入研究,建立了一套完整的适合于压水堆的主回路裂变产物源项计算方法。在计算模型中提出了模块化的理念,即将主回路中的系统、设备或区域处理成若干个互相独立的形式统一的模块,通过模块的串、并联,可以方便地描述具有任意组成的主回路模型。进一步将模块参数进行统一,可以在计算模型中增加模块而不会改变微分方程的结构形式,从而实现所建计算模型的通用性,使计算模型更加灵活,适应性更强。在此研究基础上开发了主回路裂变产物源项计算程序并进行了初步验证,计算结果表明程序的计算精度可以满足使用要求。

参考文献:

- [1] 刘原中. 轻水堆一回路中放射性核素浓度的计算方法及计算机程序[J]. 辐射防护, 1986, 11(6): 409-424.
- [2] NB/T 20194-2012, 压水堆核电厂辐射屏蔽设计准则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.

(责任编辑: 张明军)