

# 反冲释放对反应堆活化腐蚀产物源项的影响研究

谭琳 张竞宇 赵晓泽 肖懿鑫 王娟娟 于琥 倪王慕鸿  
(华北电力大学 核科学与工程学院 北京 102206)

**摘要** 中子与靶核碰撞时引起的靶核反冲释放,对于反应堆活化腐蚀产物源项分析有非常重要的影响。对于使用水冷方式的反应堆,在辐照区反冲释放可使活化腐蚀产物离开壁面进入到冷却剂中,并随冷却剂迁移到非辐照区,使非辐照区的设备也带有放射性。本文研究了反冲释放在反应堆内的作用方式,建立了反冲释放的计算模型和程序模块,并集成到活化腐蚀产物源项分析程序CATE中,利用改进后的CATE程序,计算分析了堆芯与蒸汽发生器中主要的活化腐蚀产物核素 $^{58}\text{Co}$ 与 $^{60}\text{Co}$ 在考虑反冲释放前后的数值,明确了反冲释放效应的影响程度。计算结果表明:考虑反冲释放前后堆芯处 $^{58}\text{Co}$ 与 $^{60}\text{Co}$ 活度的比值有所下降,而在蒸汽发生器中的比值则有所上升;反冲释放的总作用概率与腐蚀产物层厚度相关,会随着反应堆的运行而逐渐降低,反应堆运行初期作用概率的数量级在 $10^{-1}$ ,对活化腐蚀产物的迁移有显著影响,100 d后作用概率的数量级下降到 $10^{-3}$ ,对活化腐蚀产物源项的影响较小。

**关键词** 水冷堆, 活化腐蚀产物, 反冲释放, CATE程序, 计算模拟

**中图分类号** TL99

**DOI:** 10.11889/j.0253-3219.2023.hjs.46.100603

## Study on recoil release on the source term of activated corrosion product in reactor

TAN Lin ZHANG Jingyu ZHAO Xiaoze XIAO Yixin WANG Juanjuan  
YU Xiao NI Wangmuhong

(School of Nuclear Science and Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract** [Background] The recoil release caused by the collision of a neutron with a target nucleus has a significant impact on the analysis of activated corrosion product sources in a reactor. In water cooled reactors, a recoil release in the irradiated area can cause the activation corrosion products to leave the wall surface and enter the coolant, which then migrates to the non-irradiated area with the flow of coolant, thereby making the non-irradiated equipment also radioactive. [Purpose] This study aims to analyze the influence of recoil release on the source term of activated corrosion product in reactor. [Methods] Based on the investigation of the mode of action of recoil release in a reactor, a calculation model and a program module for recoil release was established and integrated into the CATE program. Then, the effects of recoil release on the concentrations of activation corrosion products in the nuclear reactor were analyzed by using two approaches, one involved specifying a recoil release probability, while the other involved dynamically calculating the recoil release probability. Finally, values of the main activated corrosion

国家磁约束核聚变能发展研究专项(No.2019YFE03110000, No.2019YFE03110003)资助

第一作者: 谭琳, 男, 1998年出生, 2020年毕业于成都理工大学工程技术学院, 现为硕士研究生, 研究领域为核科学与技术

通信作者: 张竞宇, E-mail: [poptnt@163.com](mailto:poptnt@163.com)

收稿日期: 2022-11-30, 修回日期: 2023-02-23

Supported by National Magnetic Confinement Fusion Program of China (No.2019YFE03110000, No.2019YFE03110003)

First author: TAN Lin, male, born in 1998, graduated from the Engineering & Technical College of Chengdu University of Technology in 2020, master student, focusing on nuclear science and technology

Corresponding author: ZHANG Jingyu, E-mail: [poptnt@163.com](mailto:poptnt@163.com)

Received date: 2022-11-30, revised date: 2023-02-23

products nuclides  $^{58}\text{Co}$  and  $^{60}\text{Co}$  in the core and steam generator before and after considering recoil release were calculated, and the impact of recoil release on the activation corrosion products and its implications for the actual operation of the reactor were explored. **[Results]** The calculation results indicate that the recoil release probability decreases from 45% at the beginning of the simulation to 0.3% at the end of the simulation. However, the variation pattern of the activity ratio of  $^{58}\text{Co}$  and  $^{60}\text{Co}$  in the core and steam generator remains the same as that without recoil release. The activity ratio is 91% and 203% respectively, compared to the case without recoil release. **[Conclusions]** The total probability of recoil release is related to the thickness of the corrosion product layer and gradually decreases with the operating time of the reactor.

**Key words** Water-cooled reactors, Recoil release, Activated corrosion products, CATE, Computational simulation

反应堆活性区的结构材料由于其所处的环境会在反应堆运行时发生腐蚀和活化,其中一部分活化腐蚀产物会进入冷却剂并迁移到回路的其他设备中。活化腐蚀产物会使反应堆一回路各设备带有放射性,因此计算各设备中活化腐蚀产物的含量对评估维修期间工作人员受到的辐射伤害有重要意义。

对于反应堆堆芯材料,不仅有其他设备中常见的溶解、侵蚀等腐蚀产物的转移方式,还有由于堆芯大量快中子辐照而发生反冲释放效应造成物质转移,比如 $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ 这样的反应,其反应产物原子核不仅可以留在腐蚀产物层中等待溶解、侵蚀<sup>[1]</sup>,还可能具有足够的动能直接离开腐蚀产物层而进入冷却剂<sup>[2]</sup>,或是腐蚀产物层表面的靶核与快中子发生弹性散射而进入冷却剂中。

国际上现有的腐蚀产物源项分析程序,以法国的PACTOLE程序<sup>[3]</sup>为代表,通过计算冷却剂中的溶解度梯度或是建立流体力学模型对于腐蚀产物的溶解、侵蚀机理进行了很好的模拟,但是仍然缺少对反冲释放效应的模拟能力。因此,本文以活化腐蚀产物的反冲释放效应为研究对象,并依托华北电力大学核设施源项研究组开发的CATE程序<sup>[4]</sup>,研究反冲释放对反应堆活化腐蚀产物源项的影响。

CATE-V3.0版本<sup>[5]</sup>是一种先进的核电站计算工具,它通过建立四相多节点模型来评估活化腐蚀产物对水冷回路中不同区域的影响。模型综合考虑了活化腐蚀产物的多种物质形态,并且对各个节点建立合适的质量、活度平衡方程来计算核电厂运行期间各设备节点的活化腐蚀产物质量变化,从而能更准确地评估活化腐蚀产物导致的放射性源项。本文在CATE-V3.0程序的基础上,还建立了一种反冲释放的计算模型,并将其集成到该程序中。这种模型可以用来分析反冲释放对活化腐蚀产物核素在堆芯和蒸气发生器中活度的影响。

## 1 反冲释放作用机理及计算模型

### 1.1 反冲释放作用机理

在粒子物理学中反冲释放是指高能粒子与介质中原子核或电子发生碰撞后,介质中的原子核或电子获得一部分粒子的能量而被弹出,而高能粒子则发生反冲运动的现象。而在反应堆中快中子与腐蚀产物层的靶核也可以发生反冲释放而使靶核离开原来位置<sup>[6]</sup>,一般将中子被靶核吸收而使靶核离开原来位置的作用称为直接反冲释放<sup>[7]</sup>,将中子与靶核发生散射而使靶核离开原来位置的作用称为间接反冲释放<sup>[8]</sup>。

### 1.2 直接反冲释放的计算

发生直接反冲释放时,位于 $x$ 处的靶核吸收中子并能成功进入冷却剂的最大反冲释放空间角为 $\theta$ ,因此对于 $x$ 处的反冲释放空间角满足 $\Omega < \theta$ 的反冲释放概率 $p(x)$ 可以表示为:

$$p(x) = \int_{\Omega < \theta} \frac{1}{4\pi} d\Omega \quad (1)$$

因此,对应总的直接反冲释放概率 $p$ 可表示为:

$$p = \int_0^d p(x) dx \quad (2)$$

如图1和图2所示,产物层厚度 $d$ 与反冲释放距离 $R_d$ 之间的大小关系也会影响反冲释放的概率,因此,直接反冲释放的概率可表示为:

$$\begin{cases} p_{\text{avg}} = \frac{1}{d} \int_{R_d-d}^{R_d} p(x) dx, & d < R_d \\ p_{\text{avg}} = \frac{1}{d} \int_0^{R_d} p(x) dx, & R_d < d \end{cases} \quad (3)$$

其中,反冲释放距离 $R$ 由式(4)<sup>[9]</sup>计算得到:

$$R = 3.5 \times 10^{-4} \frac{E}{\rho} \quad (4)$$

式中: $E$ 为入射粒子能量,eV; $\rho$ 为靶物质密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

而 $R_d$ 平均反冲释放距离则可由式(5)<sup>[9]</sup>计算

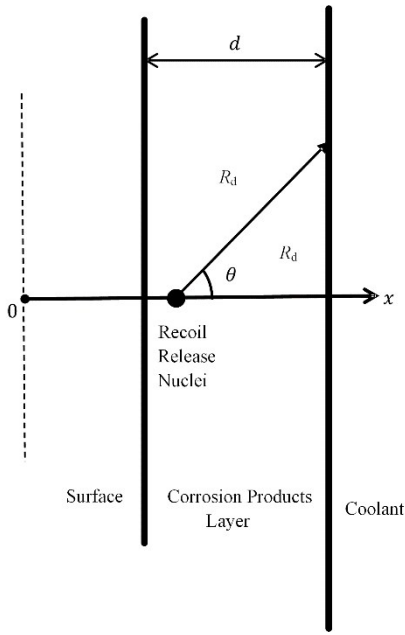


图1 腐蚀产物层厚度小于反冲释放距离  
Fig.1 Corrosion product layer thickness is less than the recoil release distance

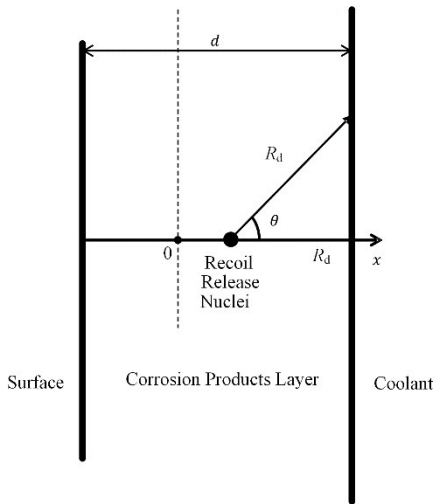


图2 反冲释放距离小于腐蚀产物层厚度  
Fig.2 Recoil release distance is less than the corrosion product layer thickness

得到:

$$R_d = \frac{\int R(E) \cdot \sigma(E) \cdot \phi(E) dE}{\int \sigma(E) \cdot \phi(E) dE} \quad (5)$$

式中:  $R(E)$  是入射粒子能量为  $E$  时的反冲释放距离,  $m$ ;  $\sigma(E)$  是能量为  $E$  时的反应截面,  $m^2$ ;  $\phi(E)$  是能量在  $E$  到  $E+dE$  时的中子通量,  $\text{个} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 。

### 1.3 间接反冲释放的计算

对于各项同性的快中子入射到均匀的无限大的靶上, 发生穿透与散射的中子数可通过玻尔兹曼

运方程<sup>[10]</sup>得到:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{v} \frac{\partial}{\partial t} G(x, \vec{v}_0, \vec{v}, t) - \eta \frac{\partial}{\partial t} G(x, \vec{v}_0, \vec{v}, t) = \\ N \int d\sigma \left( G(x, \vec{v}_0, \vec{v}, t) - G(x, \vec{v}_0, \vec{v}', t) - \right. \\ \left. G(x, \vec{v}_0, \vec{v}'', t) \right) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $G(x, \vec{v}_0, \vec{v}, t)$  是在  $t$  时  $x$  处以  $v_0$  的速度入射并以  $v$  的速度离开靶的中子数, 个;  $G(x, \vec{v}_0, \vec{v}', t)$  是发生散射并最终  $v'$  的速度离开靶的中子数, 个;  $G(x, \vec{v}_0, \vec{v}'', t)$  是发生反冲释放并以  $v''$  的速度离开靶的中子数, 个;  $\eta$  是散射角余弦值;  $N$  为靶核的原子数密度,  $m^{-3}$ ;  $\sigma$  是对于散射以及反冲释放的截面,  $m^2$ 。

随后对输运方程进行展开计算<sup>[10-15]</sup>, 可以得到在靶表面  $x$  处能量为  $E$  的粒子的间接散射概率为:

$$H(x, E) = \frac{3}{4\pi^2} \frac{F(x, E)}{NC_0U_0} \quad (7)$$

式中:  $U_0$  是靶的表面束缚能,  $eV$ ;  $C_0$  是一个与截面有关的常数;  $F(x, E)$  是一个与能量沉积相关的函数。

因此, 在表面附近能量为  $E$  的粒子的总间接散射率为:

$$S = \int_{-\infty}^0 H(x, E) dx \quad (8)$$

而入射中子在靶中引起的总反应次数  $R_t$  可表示为:

$$R_t = \int_{\delta} N \sigma d\delta \quad (9)$$

式中:  $\delta$  是中子在靶中穿行的平均距离,  $m$ 。

因此, 对于平均能量为  $\bar{E}$  的入射中子, 每个中子可以在表面引发的反冲释放可表示为:

$$P = S \times R_t \quad (10)$$

即:

$$P = \frac{3g}{2\pi^2} \frac{\bar{E} \sigma}{C_0 U_0} \quad (11)$$

式中:  $\bar{E}$  是入射中子的平均能量,  $eV$ ;  $\sigma$  是总截面,  $m^2$ ;  $g$  是一个与粒子穿行距离相关的常数。

## 2 计算结果分析

在核电厂中, 主要关注和监测的活化腐蚀产物源项是  $^{58}\text{Co}$  与  $^{60}\text{Co}$ 。相较于  $^{58}\text{Ni}(n, p)^{58}\text{Co}$  反应<sup>[16]</sup>,  $^{59}\text{Co}(n, g)^{60}\text{Co}$  反应<sup>[17]</sup>的快中子俘获截面很小, 辐照区中的  $^{60}\text{Co}$  几乎不会发生反冲释放作用。因此, 无论是否考虑反冲释放,  $^{60}\text{Co}$  在堆芯和蒸气发生器中的活度分布几乎不会发生变化, 所以, 国际上<sup>[8]</sup>通常使用  $^{58}\text{Co}$  与  $^{60}\text{Co}$  活度的比值来评价反冲释放对  $^{58}\text{Co}$  在设备中分布的影响。基于此, 本文在 CATE 程序

的基础上首先计算几个固定的反冲释放概率对堆芯以及蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co活度比值的影响,随后计算反应堆实际运行时反冲释放概率的变化,并以此为基础,分析在动态反冲释放概率条件下堆芯与蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co的比值。

### 2.1 反冲释放算例描述

设定冷却剂回路在正常稳态工况下满功率运行200 d,使用CATE程序计算活化腐蚀产物在一回路不同空间区域的分布。模拟过程中使用到运行参数列于表1。

### 2.2 不同反冲释放概率对活度分布的影响

如图3、4所示,无反冲释放时(反冲释放概率为0%),蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co活度与反应堆运行时间的平方近似呈线性关系,随着反冲释放概率的增大,蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co活度也随之增加,但<sup>58</sup>Co活度的变化规律依旧与运行时间的平方近似呈线性关系。因此,反冲释放作用不会改变蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co活度随时间的变化规律,仅增大了蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co的活度。此外,还可以注意到,当反冲释放概率从0%增加到10%时,蒸汽发生器壁面<sup>58</sup>Co活度增加非常迅速,而反冲释放概率从10%增加到50%,蒸汽发生器壁面<sup>58</sup>Co活度增加较小,这主要与壁面和冷却剂中活化腐蚀产物离子浓度的差别有关。当反冲释放概率较小时,堆芯壁面的活化腐蚀产物离子浓度大于冷却剂中的浓度,因此,反冲释放的活化腐蚀产物离子进入冷却剂后,基本上全部通过冷却剂携带进入蒸汽发生器。当反冲释放概率较大时,尽管有更多的活化腐蚀产物离子通过反冲释放离开堆芯壁面

进入冷却剂,但此时由于冷却剂中活化腐蚀产物离子浓度大于堆芯壁面的浓度,因此,一部分反冲释放进入冷却剂的活化腐蚀产物离子又会沉积回到堆芯壁面,剩余部分则通过冷却剂携带进入蒸汽发生器。

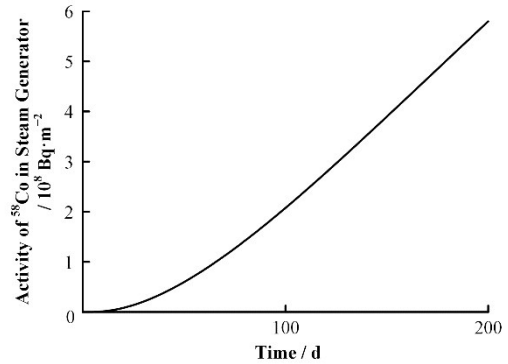


图3 无反冲释放时蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co活度随运行时间的变化

Fig.3 Variation of <sup>58</sup>Co activity in the steam generator with run time (with no recoil release)

同时为了进一步分析不同反冲释放概率的影响,分别计算了反冲释放概率分别为0%、10%、20%、30%、40%以及50%时反应堆运行前200 d内堆芯与蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co活度比值。

如图5所示,在堆芯中,较低概率的反冲释放作用会使一部分<sup>58</sup>Co离开堆芯,因而降低了<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co活度比值在堆芯中的最大值,同时较低的反冲释放概率不但对初始时刻堆芯处的活度比值影响较小,而且也不会改变活度比值在堆芯中的变化趋势(即随运行时间先增大后减小);相反,高概率的反

表1 压水堆核电站一回路运行参数

Table 1 Operating parameters of primary circuit of classical pressurized water reactor nuclear power plant

参数 Parameter	数值 Value
非辐照区*温度 Temperature out-flux / °C	3.03×10 <sup>2</sup>
辐照区**温度 Temperature in-flux / °C	3.30×10 <sup>2</sup>
冷却剂平均密度 Coolant average density / kg·s <sup>-3</sup>	7.10×10 <sup>2</sup>
冷却剂动力黏度 Coolant power viscosity / N·s·m <sup>-2</sup>	8.83×10 <sup>-5</sup>
主回路冷却剂体积 Main circuit coolant volume / m <sup>3</sup>	2.27×10 <sup>2</sup>
快中子通量密度 Fast neutron flux / n·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	1.86×10 <sup>18</sup>
热中子通量密度 Thermal neutron flux / n·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup>	3.18×10 <sup>17</sup>
辐照区管壁表面积 Surface area of pipe surface in in-flux / m <sup>2</sup>	9.30×10 <sup>3</sup>
非辐照区管壁表面积 Surface area of pipe surface in out-flux / m <sup>2</sup>	1.36×10 <sup>4</sup>
过滤器质量流量 Flowrate of filter / kg·s <sup>-1</sup>	3.78
颗粒过滤因子 Filter factor of particles / %	90
离子净化因子 Purification factor of ions / %	90

注:\* 非辐照区指蒸汽发生器、冷管段、热管段等一系列非反应堆堆芯区的一回路区域;\*\* 辐照区指反应堆堆芯  
Notes: \* The non-irradiated area refers to the primary circuit area of the non-reactor core area, such as the steam generator, cold tube section and heat pipe section; \*\* Irradiated area refers to the reactor core

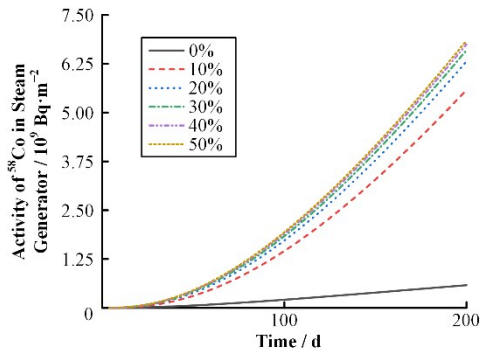


图4 不同反冲释放概率下蒸汽发生器中的<sup>58</sup>Co活度  
Fig.4 <sup>58</sup>Co activity in steam generators with different recoil release probabilities

冲释放作用则会使一大部分的<sup>58</sup>Co离开堆芯,即使是运行初期堆芯中的活度比值就有约50%的下降,并且高概率的反冲释放作用不仅会改变循环初期的活度比值变化规律(变为随运行时间单调减小),而且还会使该比值迅速下降并在整个循环中都保持在一个很低的水平。此外可以注意到堆芯中也出现了,当反冲释放概率从0%增加到10%时,堆芯<sup>58</sup>Co活度的减小幅度相对较大,而反冲释放概率从10%增加到50%,堆芯<sup>58</sup>Co活度的减小幅度相对较小的现象,这同样也是因为壁面和冷却剂中活化腐蚀产物离子浓度的差别而引起的。

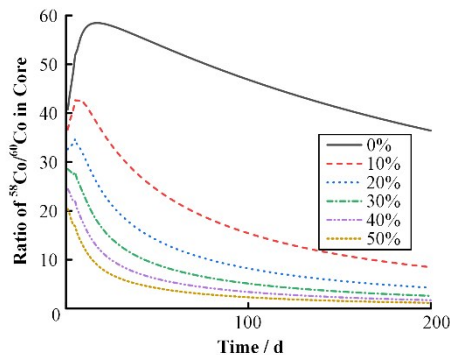


图5 不同反冲释放概率下堆芯中<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co的活度比值  
Fig.5 Activity ratios of <sup>58</sup>Co to <sup>60</sup>Co in cores with different recoil release probabilities

如图6所示,相较于无反冲释放(反冲释放概率为0%),即使是较低概率的反冲释放作用也会显著改变蒸气发生器中的活度比值的变化规律(变为先上升后下降),并且反冲释放作用还会影响蒸汽发生器中活度比值首次出现下降的时间。

### 2.3 反冲释放概率随运行时间的变化

由反冲释放的导出式可知反冲释放的总概率由直接反冲释放概率与间接反冲释放概率组成,显然对于间接反冲释放概率其在运行周期内几乎不会发

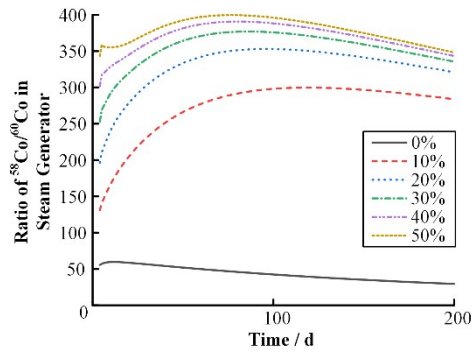


图6 不同反冲释放概率下蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co的活度比值  
Fig.6 Activity ratios of <sup>58</sup>Co to <sup>60</sup>Co in steam generators with different recoil release probabilities

生变化,而对于直接反冲释放概率其主要受到腐蚀产物层厚度的影响。总反冲释放概率随腐蚀产物层厚度的变化如图7所示。

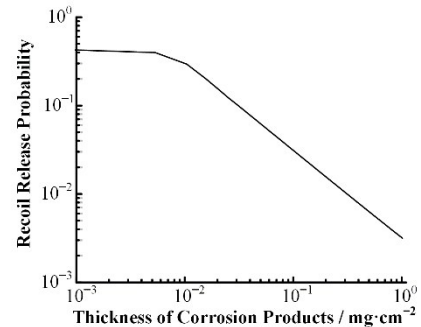


图7 反冲释放概率随腐蚀产物层厚度的变化  
Fig.7 Variation of recoil release probability with corrosion product layer thickness

随着反应堆的运行,堆芯处的腐蚀产物层平均厚度会逐渐增加,这会使反冲释放总概率如图7所示变化。本文计算得到的反冲释放概率从初始时刻的45%下降为0.3%,与文献[6]中反冲释放概率的变化范围(约从50%下降为1%)非常接近,此外,本文对于反冲释放概率随腐蚀产物层厚度的变化趋势的计算结果,也与文献[6]基本一致,从而验证了本文对于反冲释放概率的计算模型和计算结果的合理性。

### 2.4 动态反冲释放概率对活度及活度比值的影响

图8~10分别是利用活化腐蚀产物源项分析程序CATE计算动态反冲释放概率下的源项结果。

如图8所示,对于蒸气发生器中的<sup>58</sup>Co活度,动态反冲释放增加了<sup>58</sup>Co在蒸气发生器中的活度,但活度与反应堆运行时间的平方仍然保持线性关系。

如图9所示,对于堆芯中的<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co活度比

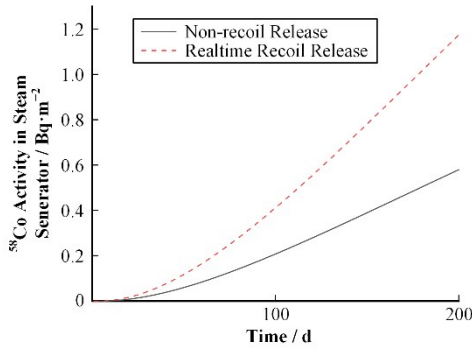


图8 动态反冲释放概率下蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co活度  
Fig.8 <sup>58</sup>Co activity in steam generator with real-time recoil release probability

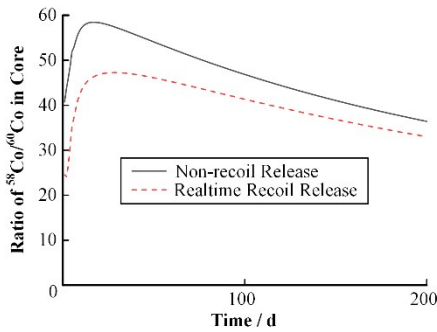


图9 动态反冲释放概率下堆芯中<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co的活度比值  
Fig.9 Activity ratio of <sup>58</sup>Co to <sup>60</sup>Co in the core with real-time recoil release probability

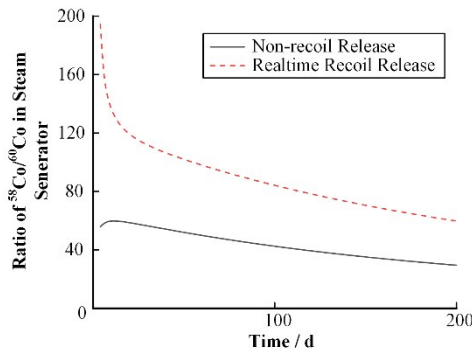


图10 动态反冲释放概率下蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co的活度比值  
Fig.10 Activity ratios of <sup>58</sup>Co to <sup>60</sup>Co in steam generators with real-time recoil release probability

值,动态反冲释放概率的前两日与反冲释放概率为40%的情况接近,其活度比值分别是无反冲释放时的60%和55%,随后活度比值开始上升,第10 d时其活度比值是无反冲释放时的76%,第50 d时其活度比值是无反冲释放时的85%,第100 d天时其活度比值是无反冲释放时的88%,第200 d时其活度比值是无反冲释放时的91%。动态反冲放概率下堆芯的活度比值变化趋势总体上与低反冲释放概率下的活度

比值变化相同。

如图10所示,对于蒸汽发生器中的<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co活度比值,动态反冲释放概率的第2 d是无反冲释放时的340%,第10 d时其活度比值是无反冲释放时的229%,随后开始快速下降并在整个模拟期内活度比值始终保持在200%左右,例如第50 d时其活度比值是无反冲释放时的196%,第100 d时其活度比值为198%,而第200 d时其活度比值则为203%。动态反冲释放概率下尽管运行前期与固定反冲释放概率的变化趋势不尽相同,这主要是由于反冲释放概率迅速下降使辐照区的<sup>58</sup>Co的转移速率迅速减小而<sup>60</sup>Co的转移速率基本不变而导致的,但动态反冲释放使得整个模拟期间活度比值比不考虑反冲释放时提高。

### 3 结语

本文通过研究反冲释放在反应堆内的作用方式,建立相应的反冲释放模型,同时基于活化腐蚀产物源项分析程序CATE编写相应的计算模块,并利用CATE程序计算反冲释放作用对堆芯与蒸汽发生器中<sup>58</sup>Co与<sup>60</sup>Co活度比值的影响。计算结果表明:相对于不考虑反冲释放的计算结果,反冲释放作用在反应堆运行初期最多使堆芯处的活度比值下降约43%,而使蒸汽发生器处的活度比值上升约600%,随着反应堆运行到第100 d堆芯的活度比值下降逐渐减少到12%,而蒸汽发生器的活度比值的变化减小到198%。总体上来看,反冲释放对堆芯活化腐蚀产物源项的影响会逐渐降低,但始终会使蒸汽发生器中的<sup>58</sup>Co活度明显提升。

**作者贡献声明** 谭琳负责实施研究,采集数据,分析解释数据,起草文章;张竞宇负责对文章的知识性内容作批评性审阅,指导,技术支持;赵晓泽负责技术支持,统计分析,内容校核;肖懿鑫负责采集数据,分析数据;王娟娟负责采集数据,分析数据;于虢负责采集数据,分析数据;倪王慕鸿负责采集数据,分析数据。

### 参考文献

- 1 Henshaw J, McGurk J, Dickinson S, *et al.* Modelling zinc behavior in PWR plant[J]. *Revue Générale Nucléaire*, 2012(6): 23 - 32. DOI: 10.1051/rgn/20126023.
- 2 Lee C B. Evaluation of CRUDTRAN code to predict transport of corrosion products and radioactivity in the PWR primary coolant system[R]. INIS-FR-1546, International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria), 2002.

- 3 Beslu P, Robin J C, Coulet F, *et al.* PACTOLE: A computer code to predict the activation and transport of corrosion products in PWRs[R]. CEA Centre d'Etudes de Cadarache, 1994.
- 4 李璐, 张竞宇, 郭庆洋, 等. 水冷聚变堆主回路活化产物源项计算分析[J]. 核技术, 2016, **39**(11): 110603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110603).  
LI Lu, ZHANG Jingyu, GUO Qingyang, *et al.* Calculation and analysis of activation products source term in water-cooled fusion reactor primary circuit[J]. Nuclear Techniques, 2016, **39**(11): 110603. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110603](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2016.hjs.39.110603).
- 5 郭庆洋, 张竞宇, 陈义学. 聚变堆水冷回路中多物相活化腐蚀产物计算分析[J]. 核技术, 2019, **42**(6): 060602. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060602](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060602).  
GUO Qingyang, ZHANG Jingyu, CHEN Yixue. Calculation and analysis of activated corrosion products of multi-phase in water cooling loops under fusion reactor [J]. Nuclear Techniques, 2019, **42**(6): 060602. DOI: [10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060602](https://doi.org/10.11889/j.0253-3219.2019.hjs.42.060602).
- 6 Lee C B. Modeling of corrosion product transport in PWR primary coolant[D]. Massachusetts Institute of Technology, 1990.
- 7 Bickford W E. Transport and deposition of activation products in a helium cooled fusion power plant[R]. Battelle Pacific Northwest Laboratory, 1980. DOI: [10.2172/5091811](https://doi.org/10.2172/5091811).
- 8 Sigmund P. Theory of sputtering. I. Sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets[J]. Physical Review, 1969, **184**(2): 383. DOI: [10.1103/PhysRev.184.383](https://doi.org/10.1103/PhysRev.184.383).
- 9 Gibbons J F. Ion implantation in semiconductors—Part I: range distribution theory and experiments[J]. Proceedings of the IEEE, 1968, **56**(3): 295 - 319. DOI: [10.1109/PROC.1968.6273](https://doi.org/10.1109/PROC.1968.6273).
- 10 Sigmund P. Theory of sputtering. I. sputtering yield of amorphous and polycrystalline targets[J]. Physical Review, 1969, **184**(2): 383 - 416. DOI: [10.1103/physrev.184.383](https://doi.org/10.1103/physrev.184.383).
- 11 Lindhard J, Nielsen V, Scharff M, *et al.* Integral equations governing radiation effects[J]. Kongelige Danske Videnskabernes Selskab Matematisk Fysiske, 1963, **33**(10): 1 - 42.
- 12 Spencer L V. Theory of electron penetration[J]. Physical Review, 1955, **98**(6): 1597. DOI: [10.1103/PhysRev.98.1597](https://doi.org/10.1103/PhysRev.98.1597).
- 13 Sanders J B. Ranges of projectiles in amorphous materials [J]. Canadian Journal of Physics, 1968, **46**(6): 455 - 465. DOI: [10.1139/p68-058](https://doi.org/10.1139/p68-058).
- 14 Sigmund P. Sputtering efficiency of amorphous substances [J]. Canadian Journal of Physics, 1968, **46**(6): 731 - 737. DOI: [10.1139/p68-090](https://doi.org/10.1139/p68-090).
- 15 Sigmund P. On the number of atoms displaced by implanted ions or energetic recoil atoms[J]. Applied Physics Letters, 1969, **14**(3): 114 - 117. DOI: [10.1063/1.1652730](https://doi.org/10.1063/1.1652730).
- 16 Parashari S, Mukherjee S, Naik H, *et al.* Measurement of the  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$  and  $^{58}\text{Ni}(n,2n)^{57}\text{Ni}$  reaction cross-sections for fast neutron energies up to 18 MeV[J]. The European Physical Journal A, 2019, **55**(4): 51. DOI: [10.1140/epja/i2019-12726-2](https://doi.org/10.1140/epja/i2019-12726-2).
- 17 Mosen A. Analytical chemistry department annual report, 1975[R]. General Atomic Co., San Diego, CA (USA), 1976.