

文章编号: 0258-0926(2014)06-0011-06; doi:10.13832/j.jnpe.2014.06.0011

极端事故假设下西安脉冲堆源项计算

杨 宁, 唐秀欢, 张文首, 袁建新

西北核技术研究所, 西安, 710024

摘要: 使用 ORIGEN2 软件计算了西安脉冲堆 2 MW 满功率连续运行和 3 种断续运行至燃耗末期的堆芯放射性积存量; 选取计算结果中最大积存量 4.13×10^{16} Bq, 辅以燃料元件包壳全部破损的极端事故假设和保守地释放模型计算放射性物质环境释放量。结果表明, 在 1 min 内的放射性裂变产物释放高达 41.0%, 有效释放时间大概持续 5 min, 最大环境释放量为 4.54×10^{12} Bq。

关键词: 极端事故; ORIGEN2; 源项; 放射性

中图分类号: TL732 文献标志码: A

0 引 言

西安脉冲堆是我国首座实用型池式研究堆, 稳态运行额定功率 2 MW, 设计最大燃耗深度 450 MW·d。西安脉冲堆地震设防烈度 IX 度, 即在烈度为 IX 的地震作用载荷下, 反应堆厂房不会倒塌, 堆水池不会破裂, 堆内构件不会遭到破坏^[1]。因此, 以往针对西安脉冲堆开展事故后果评价时, 包括《西安脉冲堆最终安全分析报告》, 选取的最大假想事故均为 10 根燃料元件破损^[2]。

最高烈度为 XI 的汶川地震发生后, 国家核安全监管当局要求开展西安脉冲堆超设计基准事故下的放射性后果评价工作。本文以地震为初因事件, 采用业内广为使用的 ORIGEN2 软件^[3-5], 选取极少发生的燃料元件全部破损的极端事故情景, 计算西安脉冲堆在这一保守假设下的源项, 以作为西安脉冲堆开展超设计基准事故放射性后果评价的输入参数。

1 源项组成

反应堆源项一般由 3 部分组成^[6]。第 1 部分是比例最大的部分, 主要指铀系元素和裂变产物; 第 2 部分是中子活化产物, 主要是堆内构件和混凝土生物屏蔽层; 第 3 部分相对于前二者非常小, 是冷却剂流道表面沉积的裂变产物和腐蚀活化产物。

铀系核素发出 α 粒子和低能 γ 射线, 通常它们

不产生任何外部辐射剂量, 在非堆芯熔毁事故中释放到环境的几率微乎其微^[7]; 在安全停堆的前提下, 西安脉冲堆堆芯即便完全失水, 依靠空气自然对流循环也足以保障余热排出, 避免堆芯熔毁^[8]。因此, 在本文的源项计算中对铀系元素不予考虑。

西安脉冲堆的腐蚀活化产物主要是 ^{55}Fe 、 ^{58}Co 、 ^{60}Co 、 ^{51}Cr 、 ^{55}Cr 、 ^{54}Mn 、 ^{56}Mn 、 ^{65}Ni 等。脉冲堆发生事故时, 这些腐蚀活化产物会跟随一回水排入废液处理系统。此外, 主要活化产物还有 ^{16}N 和 ^{41}Ar ; 前者半衰期只有 7.2 s, 环境影响可以忽略; 文献计算表明, 西安脉冲堆功率运行时 ^{40}Ar 的释放率约为 3.257×10^3 Bq/s^[9], 不会对环境造成明显影响。裂变产物因为挥发性卤素和放射性惰性气体同位素的存在, 是事故工况下放射性物质释放的主要来源, 也是西安脉冲堆源项计算关注的重点, 如 Kr、Xe、I、Cs 等。

2 源项计算方法

2.1 核反应截面数据修正

ORIGEN2 是美国橡树岭国家实验室开发的点燃耗及放射性衰变计算程序。它集成 3 类数据库: 衰变数据库、截面和裂变产物产额数据库及 18 群光子数据库。其中, 衰变数据和光子数据对任一核素均为常数, 可直接用于西安脉冲堆源项计算; 截面数据是能量的函数, 因中子能谱不同

而改变。因此,开展源项计算前,必须修正截面数据,使之适用于西安脉冲堆。

本文采用 MCNP/4B 计算西安脉冲堆的截面数据^[10]。计算采用 F4 卡计算栅元的中子平均通量,采用 FM4 卡计算对应栅元内的积分微观截面,将积分微观截面计算结果除以中子平均通量计算结果可得平均微观反应截面数据。计算后的修正截面数据如表 2 所示。

将修正截面数据录入 ORIGEN2 程序的截面数据替换文件,程序执行过程时将读取替换文件中的截面数据,并自动覆盖原压水堆对应截面。

2.2 计算模型

裂变产物的释放机理因反应堆事故严重程度不同而不同。对应包壳破损、燃料熔化、蒸汽爆炸、与混凝土或金属发生作用 4 种事故情况,相应的裂变产物释放机理表现为:气隙释放、熔化释放、蒸汽爆炸释放、汽化释放。本文假设事故中脉冲堆安全停堆,未发生堆芯熔毁;对应的释放机理为气隙释放,影响的因素包括堆芯积存量、裂变产物包容在燃料芯体-包壳气隙中的平衡份额,燃料元件破损率、释放过程及放射性核素自身的寿命等。

堆芯源项积存量的计算需要综合考虑:反应堆功率运行史;核燃料特性,如富集度、燃

耗水平等;受照设备的平均中子注量率;受照设备的几何与质量;材料化学成分,包括杂质和痕量元素;衰变数据和截面数据,甚至光子群数据;停堆后的衰变时间。 \sim 项主要用于中子活化构件源项计算,和项由事故情景假设决定,项由计算软件集成,其他输入参数^[11]列于表 1。

表 1 西安脉冲堆稳态运行参数
Table 1 Technical Parameters of Xi'an Pulsed Reactor in Normal Mode

| 参数名称 | 数值 |
|---|-----------------------|
| 稳态额定功率/MW | 2.0 |
| 平均中子注量密度/cm ² ·s ⁻¹ | 4.82×10 ¹³ |
| ²³⁵ U 的富集度/% | 19.75 |
| 单棒 ²³⁵ U 的含量/g | 57.1 |
| 单棒 ²³⁸ U 的含量/g | 232.01 |
| 额定 ²³⁵ U 装载量/kg | 6.05 |

燃料芯体-包壳气隙的裂变产物主要是惰性气体和易挥发性卤素核素。碱金属铯虽然也是挥发性的,但其易与铀反应,在 1000 以下多以重铀酸铯形式存在。Kr、Xe、I 等裂变产物的释放机制有 2 种:芯块温度在 400 以下时主要是反冲机制;芯块温度在 400 以上时主要是扩散过程。西安脉冲堆稳态运行时,功率最大的燃料元

表 2 ORIGEN2 自带压水堆截面数据与西安脉冲堆 MCNP 修正截面数据

Table 2 Cross Sections for PWR Packed in ORIGEN2 and Revised Data for Xi'an Pulsed Reactor Computed by MCNP

| 核素 | (n,γ)截面/b | | (n,2n)截面/b | | (n,f)截面/b | |
|-------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | 压水堆 | 西安脉冲堆 | 压水堆 | 西安脉冲堆 | 压水堆 | 西安脉冲堆 |
| ²³⁵ U | 9.266 | 16.59 | 3.230×10 ⁻³ | 3.712×10 ⁻³ | 41.07 | 86.74 |
| ²³⁶ U | 7.541 | 8.738 | 2.644×10 ⁻³ | 2.637×10 ⁻³ | 0.1975 | 0.3104 |
| ²³⁷ U | 44.24 | 73.69 | 0 | 7.469×10 ⁻³ | 0.2317 | 0.7214 |
| ²³⁸ U | 0.09021 | 2.484 | 5.525×10 ⁻³ | 4.648×10 ⁻³ | 0.1004 | 0.09938 |
| ²³⁹ U | 3.723 | 6.901 | 2.191×10 ⁻² | 2.049×10 ⁻² | 1.538 | 8.442 |
| ²⁴⁰ U | 0.5447 | 4.926 | 1.131×10 ⁻² | 1.066×10 ⁻² | 7.290×10 ⁻² | 7.595×10 ⁻² |
| ²³⁷ Np | 32.12 | 47.22 | 2.746×10 ⁻⁴ | 2.696×10 ⁻⁴ | 0.5244 | 0.4974 |
| | — | — | 7.877×10 ⁻⁴ | 7.733×10 ⁻⁴ | — | — |
| ²³⁹ Np | 11.34 | 17.67 | 0 | 1.176×10 ⁻³ | 0.4261 | 0.5708 |
| | 2.851 | 4.442 | — | — | — | — |
| ²³⁹ Pu | 58.61 | 80.41 | 1.120×10 ⁻³ | 1.982×10 ⁻³ | 1.062×10 ² | 1.626×10 ² |
| ²⁴⁰ Pu | 1.04×10 ² | 2.508×10 ² | 4.478×10 ⁻⁴ | 7.878×10 ⁻⁴ | 0.584 | 0.583 |
| ²⁴¹ Pu | 38.68 | 63.99 | 7.518×10 ⁻³ | 6.674×10 ⁻³ | 1.181×10 ² | 1.928×10 ² |
| ²⁴² Pu | 31.72 | 32.62 | 2.307×10 ⁻³ | 2.073×10 ⁻³ | 0.4146 | 0.42 |
| ²⁴³ Pu | 13.6 | 18.62 | 1.661×10 ⁻² | 1.646×10 ⁻² | 27.98 | 38.37 |
| ²⁴³ Am | 2.487 | 2.737 | 2.074×10 ⁻⁴ | 2.562×10 ⁻⁴ | 0.3959 | 0.4595 |
| | 47.26 | 52 | — | — | — | — |

注:当某反应道的产物核有基态和激发态两种能态时,此为激发态对应的反应截面; 1b=10⁻²⁸m²

件芯块平均温度 376 ，脉冲运行时芯块温度虽高于稳态值，但时间极短可以忽略，因此反冲机制在西安脉冲堆中占支配地位。实验表明，在西安脉冲堆的铀氢锆燃料元件中，当裂变产物达到放射性平衡时，裂变气体和易挥发核素释放到燃料芯体-包壳气隙中的释放份额 ξ 可用下式估算：

$$\xi = 1.5 \times 10^{-5} + 3.6 \times 10^3 \exp\left(\frac{-1.34 \times 10^4}{T + 273}\right) \quad (1)$$

式中， T 为燃料元件芯块温度，。

假设极端事故工况下，燃料元件包壳破损，气隙中的裂变气体释放到堆池上部空间。事故后 t 时刻，堆池空气的放射性浓度 C 计算模型为：

$$C = C_0 \exp\left[-\left(\lambda + \frac{Q}{V}\right)t\right] \quad (2)$$

$$C_0 = A_c \xi \frac{F}{V} \quad (3)$$

式中， C_0 为事故瞬时释放裂变产物在堆池上空的浓度， Bq/m^3 ； λ 为核素衰变常数， s^{-1} ； Q 为堆池泄漏率， m^3/s ； V 为堆池体积， m^3 ； F 为破损元件功率所占堆芯总功率之比； A_c 为堆芯裂变产物的总积存量， Bq 。

事故后 t 时刻，裂变产物单位时间内的释放量 dA_r 为：

$$dA_r = QC_0 \exp\left[-\left(\lambda + \frac{Q}{V}\right)t\right] dt \quad (4)$$

事故期间 $t_1 \sim t_2$ 时段的裂变产物释放量 A_r 为：

$$A_r = \frac{Q \cdot C_0}{\lambda + \frac{Q}{V}} \left\{ \exp\left[-\left(\lambda + \frac{Q}{V}\right)t_1\right] - \exp\left[-\left(\lambda + \frac{Q}{V}\right)t_2\right] \right\} \quad (5)$$

将所有时段和所有裂变产物对环境释放量相加求和即可得出事故期间的累计释放量。但是，累计释放量并不等于环境中的裂变产物总量，这是因为释放到环境中裂变产物也在衰变。如果考虑裂变产物衰变，事故后 t 时刻环境中裂变产物总量的变化量 dA_e 为：

$$dA_e = QC_0 \exp\left[-\left(\lambda + \frac{Q}{V}\right)t\right] dt - \lambda A_e dt \quad (6)$$

式(6)积分得 t 时刻环境中的裂变产物总量 A_e 为：

$$A_e = C_0 V \left(1 - e^{-\frac{Q}{V}t}\right) e^{-\lambda t} \quad (7)$$

2.3 事故假设

本文分析极端事故的假设条件为：

(1) 事故发生前，反应堆在额定功率 2 MW 下连续稳态运行 225 d 至燃耗末期，堆芯裂变产物的总积存量 A_p 已经达到平衡。作为对比，同时计算断续运行方式下堆芯裂变产物的放射性积存量。例如，连续满功率运行 5 d，停堆 2 d，再次连续满功率运行 5 d，停堆 2 d，如此循环(简记“连 5 间 2”，以此类推)，直至燃耗末期。计算的断续运行方式包含“连 5 间 2”、“连 4 间 2”、“连 3 间 2”。

(2) 满功率运行时堆芯内所有燃料元件芯块的温度保守估计为 500 ；据此计算，事故发生前裂变产物气体从芯块向燃料芯体-包壳气隙的长期释放份额 ξ 稳定在 1.2×10^{-4} 。

(3) 事故发生时，反应堆保护停堆。

(4) 事故发生导致堆池水全部丧失，燃料元件全部破损 ($F=100\%$)，燃料芯体-包壳气隙中的裂变产物瞬间全部释放，进入堆池内空间 ($V=37 \text{ m}^3$)。

(5) 堆大厅及外部构筑物在地震中倒塌，通风系统、特排系统失效。堆本体直接暴露在外界环境中，堆池内裂变气体以 Q 为 $0.3 \text{ m}^3/\text{s}$ 的泄露速率直接释放到环境。

3 计算结果

源项计算中重点关注的 Kr、Xe、I 等元素的堆芯积存量计算结果参见表 3。

理论上，因为间歇运行方式包含了更长的放射性物质的冷却过程，对应的积存量应该比连续运行模式小。然而，通过表 3 可见，对其中许多核素，这种结论并不严格成立。一方面软件计算过程中的舍入误差可能造成输出结果的细微差别，另一方面放射性核素的平衡是一个非常复杂的过程。其积存量不仅与自身半衰期相关，还和其来源、母体的半衰期相关^[12]。以 ^{85}Kr 为例，“连 4 间 2”模式下其积存量很少，这是因为这时候，该核素主要以其激发态 $^{85\text{m}}\text{Kr}$ 存在。此外，对于短寿命核素，其积存量存在一个饱和值，该核素到达这一饱和值之后积存量不再随时间变化^[13]。

表3 4种运行方式下西安脉冲堆裂变产物总积存量

Table 3 Fission Product Inventory of Xi'an Pulsed Reactor in Four Operation Ways

| 核素 | 半衰期 | 裂变核素积存量/Bq | | | |
|--------------------|-----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | | 连续运行 | 连5间2 | 连4间2 | 连3间2 |
| ^{83m} Kr | 109.8 min | 3.25×10 ¹⁴ | 3.25×10 ¹⁴ | 3.30×10 ¹⁴ | 3.25×10 ¹⁴ |
| ^{85m} Kr | 4.48 h | 7.65×10 ¹⁴ | 7.65×10 ¹⁴ | 7.78×10 ¹⁴ | 7.65×10 ¹⁴ |
| ⁸⁵ Kr | 10.73 a | 6.64×10 ¹² | 6.59×10 ¹² | 5.45×10 ¹² | 6.56×10 ¹² |
| ⁸⁷ Kr | 76.4 min | 1.55×10 ¹⁵ | 1.55×10 ¹⁵ | 1.57×10 ¹⁵ | 1.55×10 ¹⁵ |
| ⁸⁸ Kr | 2.84 h | 2.18×10 ¹⁵ | 2.18×10 ¹⁵ | 2.22×10 ¹⁵ | 2.18×10 ¹⁵ |
| ⁸⁹ Kr | 184 s | 2.77×10 ¹⁵ | 2.77×10 ¹⁵ | 2.82×10 ¹⁵ | 2.77×10 ¹⁵ |
| ^{131m} Xe | 11.8 d | 1.96×10 ¹³ | 1.41×10 ¹³ | 1.33×10 ¹³ | 1.18×10 ¹³ |
| ^{133m} Xe | 54.25 h | 1.20×10 ¹⁴ | 9.96×10 ¹³ | 9.29×10 ¹³ | 8.04×10 ¹³ |
| ¹³³ Xe | 5.29 d | 4.10×10 ¹⁵ | 3.13×10 ¹⁵ | 2.94×10 ¹⁵ | 2.57×10 ¹⁵ |
| ^{135m} Xe | 15.6 min | 6.95×10 ¹⁴ | 6.95×10 ¹⁴ | 7.05×10 ¹⁴ | 6.95×10 ¹⁴ |
| ¹³⁵ Xe | 9.1 h | 2.56×10 ¹⁵ | 2.56×10 ¹⁵ | 2.60×10 ¹⁵ | 2.56×10 ¹⁵ |
| ¹³⁷ Xe | 3.83 min | 3.64×10 ¹⁵ | 3.64×10 ¹⁵ | 3.69×10 ¹⁵ | 3.64×10 ¹⁵ |
| ¹³⁸ Xe | 14.1 min | 3.78×10 ¹⁵ | 3.78×10 ¹⁵ | 3.84×10 ¹⁵ | 3.78×10 ¹⁵ |
| ¹³¹ I | 8.04 d | 1.76×10 ¹⁵ | 1.36×10 ¹⁵ | 1.28×10 ¹⁵ | 1.14×10 ¹⁵ |
| ¹³² I | 142.8 min | 2.63×10 ¹⁵ | 2.24×10 ¹⁵ | 2.14×10 ¹⁵ | 1.92×10 ¹⁵ |
| ¹³³ I | 20.3 h | 4.10×10 ¹⁵ | 4.01×10 ¹⁵ | 3.99×10 ¹⁵ | 3.76×10 ¹⁵ |
| ¹³⁴ I | 52.6 min | 4.62×10 ¹⁵ | 4.62×10 ¹⁵ | 4.69×10 ¹⁵ | 4.62×10 ¹⁵ |
| ¹³⁵ I | 6.61 h | 3.81×10 ¹⁵ | 3.82×10 ¹⁵ | 3.87×10 ¹⁵ | 3.82×10 ¹⁵ |
| ¹³⁶ I | 82.9 s | 1.86×10 ¹⁵ | 1.86×10 ¹⁵ | 1.89×10 ¹⁵ | 1.86×10 ¹⁵ |
| 总计 | — | 4.13×10 ¹⁶ | 3.94×10 ¹⁶ | 3.95×10 ¹⁶ | 3.80×10 ¹⁶ |

表4 极端事故下各时段堆芯裂变产物释放量

Table 4 Released Fission-Product Quantities of Different Time Intervals

| 核素 | 各时段释放量/Bq | | | | 累计释放量/Bq |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| | 0~1 min | 1~5 min | 5~60 min | 1~5 h | |
| ^{83m} Kr | 1.50×10 ¹⁰ | 2.02×10 ¹⁰ | 3.27×10 ⁹ | 5.54×10 ⁻³ | 3.85×10 ¹⁰ |
| ^{85m} Kr | 3.53×10 ¹⁰ | 4.81×10 ¹⁰ | 7.91×10 ⁹ | 1.65×10 ⁻² | 9.13×10 ¹⁰ |
| ⁸⁵ Kr | 3.07×10 ⁸ | 4.20×10 ⁸ | 7.00×10 ⁷ | 1.68×10 ⁻⁴ | 7.97×10 ⁸ |
| ⁸⁷ Kr | 7.11×10 ¹⁰ | 9.56×10 ¹⁰ | 1.53×10 ¹⁰ | 2.22×10 ⁻² | 1.82×10 ¹¹ |
| ⁸⁸ Kr | 1.01×10 ¹¹ | 1.37×10 ¹¹ | 2.24×10 ¹⁰ | 4.28×10 ⁻² | 2.60×10 ¹¹ |
| ⁸⁹ Kr | 1.16×10 ¹¹ | 1.05×10 ¹¹ | 6.43×10 ⁹ | 6.15×10 ⁻⁸ | 2.27×10 ¹¹ |
| ^{131m} Xe | 9.05×10 ⁸ | 1.24×10 ⁹ | 2.06×10 ⁸ | 4.93×10 ⁻⁴ | 2.35×10 ⁹ |
| ^{133m} Xe | 5.55×10 ⁹ | 7.59×10 ⁹ | 1.26×10 ⁹ | 2.99×10 ⁻³ | 1.44×10 ¹⁰ |
| ¹³³ Xe | 1.89×10 ¹¹ | 2.59×10 ¹¹ | 4.32×10 ¹⁰ | 1.03×10 ⁻¹ | 4.92×10 ¹¹ |
| ^{135m} Xe | 3.15×10 ¹⁰ | 3.96×10 ¹⁰ | 5.38×10 ⁹ | 1.12×10 ⁻³ | 7.65×10 ¹⁰ |
| ¹³⁵ Xe | 1.18×10 ¹¹ | 1.61×10 ¹¹ | 2.68×10 ¹⁰ | 5.98×10 ⁻² | 3.07×10 ¹¹ |
| ¹³⁷ Xe | 1.55×10 ¹¹ | 1.52×10 ¹¹ | 1.13×10 ¹⁰ | 1.29×10 ⁻⁶ | 3.18×10 ¹¹ |
| ¹³⁸ Xe | 1.71×10 ¹¹ | 2.13×10 ¹¹ | 2.83×10 ¹⁰ | 4.54×10 ⁻³ | 4.12×10 ¹¹ |
| ¹³¹ I | 8.15×10 ¹⁰ | 1.11×10 ¹¹ | 1.86×10 ¹⁰ | 4.44×10 ⁻² | 2.12×10 ¹¹ |
| ¹³² I | 1.21×10 ¹¹ | 1.64×10 ¹¹ | 2.68×10 ¹⁰ | 4.91×10 ⁻² | 3.12×10 ¹¹ |
| ¹³³ I | 1.89×10 ¹¹ | 2.59×10 ¹¹ | 4.30×10 ¹⁰ | 1.01×10 ⁻¹ | 4.91×10 ¹¹ |
| ¹³⁴ I | 2.12×10 ¹¹ | 2.83×10 ¹¹ | 4.44×10 ¹⁰ | 5.16×10 ⁻² | 5.40×10 ¹¹ |
| ¹³⁵ I | 1.76×10 ¹¹ | 2.40×10 ¹¹ | 3.97×10 ¹⁰ | 8.65×10 ⁻² | 4.56×10 ¹¹ |
| ¹³⁶ I | 6.89×10 ¹⁰ | 4.01×10 ¹⁰ | 7.85×10 ⁸ | 1.96×10 ⁻¹⁵ | 1.10×10 ¹¹ |
| 总计 | 1.86×10 ¹² | 2.34×10 ¹² | 3.45×10 ¹¹ | 5.91×10 ⁻¹ | 4.54×10 ¹² |

因此,对某些核素,连续运行模式并不一定比间歇运行模式具有更高的积存量。

本文选取放射性积存量最大的连续运行模

式,依据环境释放模型计算各时段环境释放量见表4。

由表4可见,该极端事故假设下,最大累计

释放量为 4.54×10^{12} Bq。由于堆本体泄漏率高, 释放过程快, 41%的裂变产物于 1 min 内释放, 5 min 内释放的裂变产物占裂变产物在燃料芯体-包壳气隙中总含量的 92.5%。

短寿命核素的释放过程对总的累计释放量有显著影响。以 ^{136}I 、 ^{89}Kr 、 ^{137}Xe 、 ^{138}Xe 、 $^{135\text{m}}\text{Xe}$ 为例, 各核素的半衰期分别为 82.9、184 s, 3.83、14.1、15.6 min; 计算表明: 各核素环境累计释放量分别占燃料芯体-包壳气隙中该核素含量的 49%、68%、73%、91%、92%; 不难发现这一取值与核素半衰期呈正相关性。这是因为短寿命裂变产物在向环境释放的同时, 自身也因衰变急剧减少, 半衰期越短, 衰减越快, 最终向环境释放的量越少。因此, 事故假设中的泄漏率越大, 总的环境累计释放量也就越大。

长寿命裂变产物的环境释放量应作为反应堆源项关注的重点。这主要是因为: 长寿命裂变产物的环境累计释放量基本与泄漏率无关。以 ^{85}Kr 为例, 由于其半衰期长达 10.73 a, 一般的事事故泄漏时间与之相比可以忽略, 燃料芯体-包壳气隙中的 ^{85}Kr 最终都将释放到环境中; 长寿命核素的长期性环境影响处于突出地位。虽然在事故情景假设中可以选取更大的泄漏率参数, 让更多的短寿命裂变产物释放到环境中, 但这些释放到环境中的短寿命裂变产物仍在急剧衰减中。由图 1 可见, 随着时间的增加, 各释放时段末环境中的裂变产物总量与裂变产物总释放量之间的差距越来越大, 事故后 5 h 时环境中的裂变产物总量远小于最大累计释放量。因此, 最大累计释放量为 4.54×10^{12} Bq 的估值是非常保守的。

本文计算中假设堆本体破损致使堆池水完全

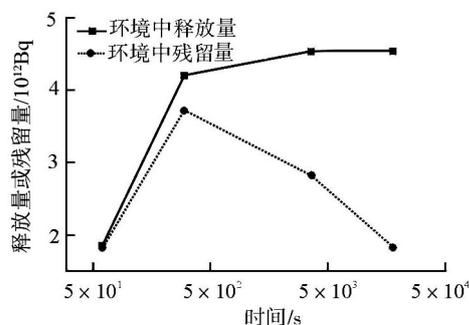


图 1 各时段裂变产物环境释放量与环境残留量
Fig. 1 Total Quantity of Fission Products Released to Environment and of Those Existing in Environment

流失, 这种看似极端的预设条件对西安脉冲堆却是一种偏安全的事故情景: 依靠空气自然循环实现堆芯冷却, 避免堆芯熔毁。

另一种小概率情况是, 当破损位置位于堆芯活性区高度范围, 部分冷却剂长时间保留在堆池而淹没堆芯底部时, 此时, 无论是位于堆芯下部的水还是上部的空气都无法建立充分的自然循环, 最终将因余热无法导出而导致堆芯熔毁^[14]。在该种事故工况下, 裂变产物的释放机理还将包括熔化释放过程。在熔化释放中, 90%的惰性气体将快速释出, 高挥发性的卤素和碱金属也大部分释出, 裂变产物环境释放量也将远远大于本文的计算结果。

4 结束语

本文采用 ORIGEN2 软件, 选取适当的环境释放模型, 计算给出了西安脉冲堆在极端事故假设下的最大环境释放量为 4.54×10^{12} Bq。在计算中, 本文作了以下假设: 事故时刻堆芯放射性物质积存量最大、事故中燃料元件全部破损、气隙中的裂变产物瞬间完全释放, 这些最大化假设保证了计算结果的包络性, 同理, 以此作为输入参数的放射性后果评价也将偏于保守。

参考文献:

- [1] 李水安. 西安脉冲堆抗震设计计算[J]. 核动力工程, 2002, 23(6): 12-15.
- [2] 景春元, 郝金林, 陈达. 西安脉冲堆对环境的影响[J]. 核动力工程, 2000, 21(2): 157-161.
- [3] 赵杨军, 顾志杰. 核电厂常规运行工况下放射性惰性气体和碘的释放源项计算[J]. 辐射防护, 2010, 30(4): 226-231.
- [4] 张帆, 商学利, 郑忠良, 等. 典型事故下船用堆燃料元件包壳破损份额及源项计算研究[J]. 核科学与工程, 2011, 31(4): 331-335.
- [5] 苏卓, 邹树梁, 于涛, 等. 压水堆乏燃料源项计算与分析[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2011, 25(4): 9-12.
- [6] 贾子瑜. 源项计算分析与研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院硕士学位论文, 2004.
- [7] 朱继洲, 奚树人, 单建强, 等. 核反应堆安全分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [8] 陈立新, 赵柱民, 袁建新, 等. 西安脉冲堆大破口失水事故分析[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(8): 678-682.
- [9] 仲云红, 陈伟时, 王凯, 等. 西安脉冲堆气载放射性流出物监测[J]. 试验与研究, 2003, 26(增刊): 63-66.

- [10] 李迪, 张颖, 阿景焯, 等. ORIGEN2 程序及其在西安脉冲堆上的应用[J]. 试验与研究, 2004, 27(4): 108-114.
- [11] 杨岐, 卜永熙, 李达忠, 等. 西安脉冲反应堆[J]. 核动力工程, 2002, 23(6): 1-6.
- [12] 徐四大. 核物理学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [13] 朱磊, 陈立新, 赵柱民, 等. 西安脉冲反应堆超设计基准事故动态特性分析[J]. 原子能科学技术, 2012, 46(增刊): 800-806.
- [14] 唐秀欢, 肖艳, 杨宁, 等. 极端事故下西安脉冲堆放射性后果分析[J]. 辐射防护, 2009, 29(3): 129-134.

Source Term of Xi'an Pulsed Reactor in Extreme Severe Accident

Yang Ning, Tang Xiuhuan, Zhang Wenshou, Yuan Jianxin

Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an, 710024, China

Abstract : Inventories of radioactivity in Xi'an Pulsed Reactor (XAPR) are calculated, with the assumption that XAPR is continuously or intermittently operated at full power of 2MW until the fuel rods archive the design burnup. With a conservative releasing model, the biggest inventory 4.13×10^{16} Bq was selected to evaluate the source term of XAPR in an extreme severe accident, in which all fuel rods are supposed to be ruptured. The result shows that up to 41.0% of radioactive fission products is released in 1 minute, the release lasts for about 5 minutes, and the total radioactivity released to environment is 4.54×10^{12} Bq.

Key words : Extreme severe accident, ORIGEN2, Source term, Radioactivity

作者简介 :

杨宁(1981—),男,助理研究员。2007年毕业于西北核技术研究所核技术及应用专业,获硕士学位。现主要从事核安全方面的研究工作。

唐秀欢(1977—),男,高级工程师。2003年毕业于西北核技术研究所无机化学专业,获硕士学位。现主要从事核安全、核事故应急方面的研究工作。

张文首(1976—),男,高级工程师。2006年毕业于西北核技术研究所核技术及应用专业,获硕士学位。现主要从事反应堆应用、核测试技术等方面的研究工作。

(责任编辑:张明军)