ICS 点击此处添加ICS号

CCS点击此处添加中国标准文献分类号

**T/CNS**

中国核学会团体标准

T/CNS XXXX—XXXX

|  |
| --- |
|  |

高温气冷堆核动力厂运行工况

放射性源项分析方法

第1部分：裂变产物

Analytic Methods for Radioactive Source Term during Normal Operation in High Temperature Gas Cooled Reactor Nuclear Power Plant, Part 1: Fission Product

|  |
| --- |
| 征求意见稿 |
|  |

XXXX - XX - XX发布

XXXX - XX – XX 实施

中国核学会   发布

目  次

[目次 I](#_Toc200033204)

[前言 II](#_Toc200033205)

[1 范围 1](#_Toc200033206)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc200033207)

[3 术语和定义 1](#_Toc200033208)

[3.1 裂变产物 fission product 1](#_Toc200033209)

[4 裂变产物源项设计的原则 1](#_Toc200033210)

[5 裂变产物源项设计的范围和设计流程 2](#_Toc200033211)

[6 裂变产物源项设计的方法、计算公式、推荐参数或假设条件 2](#_Toc200033212)

[6.1 堆芯放射性总活度 2](#_Toc200033213)

[6.2一回路裂变产物释放率 2](#_Toc200033214)

[6.4 一回路裂变产物沉积源项 4](#_Toc200033215)

[6.5 流出物中的裂变产物源项 4](#_Toc200033216)

[7 裂变产物源项计算推荐工具或软件 4](#_Toc200033217)

[7.1 堆芯放射性总活度计算软件 4](#_Toc200033218)

[7.2 一回路源项计算软件 4](#_Toc200033219)

[7.3 流出物源项计算软件 4](#_Toc200033220)

[参 考 文 献 5](#_Toc200033221)

前  言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本标准由中国核学会提出。

本标准由核工业标准化研究所归口。

本标准起草单位：清华大学核能与新能源技术研究院，中核能源科技有限公司

本标准主要起草人：李川，曹建主，梁金刚，谢锋，张立国。

高温气冷堆核动力厂运行工况放射性源项分析方法

第1部分：裂变产物

1. 范围

本标准适用于球床模块式高温气冷堆核动力厂运行工况下的裂变产物源项设计与分析，包括堆芯放射性总活度、一回路裂变产物源项、一回路内表面放射性沉积以及流出物源项。

本标准主要是为高温气冷堆核动力厂运行工况裂变产物源项设计提供一套规范化的设计原则、设计流程、分析工具、计算方法以及推荐或假设的设计参数。

1. 规范性引用文件

下列文件中的有关条款通过引用而成为本文件的条款。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| HAF103 | 核动力厂调试和运行安全规定 |  |
| HAF102 | 核动力厂设计安全规定 |  |
| HAD 103/04 | 核电厂运行期间的辐射防护 |  |
| HAD 102/12 | 核动力厂辐射防护设计 |  |
| GB6249 | 核动力厂环境辐射防护规定 |  |
| GB18871 | 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 |  |
| T/CNS 22 | 高温气冷堆核电厂辐射防护设计准则 |  |
| NB/T 20443-2017 | 核电厂运行辐射防护规定 |  |

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

* 1. 裂变产物  fission product

裂变产物，是指235U、239Pu等在中子的轰击下发生裂变生成的具有不同半衰期的多种放射性核素，包含原始裂变产物即裂变碎片及由它衰变或吸收中子而得到的子体和产物。

1. 裂变产物源项设计的原则

4.1 高温气冷堆核动力厂运行工况的裂变产物源项设计应遵循合理性原则和保守性原则。

4.2 合理性原则：裂变产物源项设计应使得设计结果与运行经验或实验结果相比的差异处于合理的范围。

4.3 保守性原则：裂变产物源项设计应使得设计结果能包络运行经验值或实验结果、包络可能导致更多裂变产物产生和释放的运行工况，并保留一定的安全裕度。

1. 裂变产物源项设计的范围和设计流程

5.1 在高温气冷堆核动力厂运行工况中需重点分析的裂变产物源项包括：堆芯放射性总活度、一回路裂变产物源项、一回路内表面放射性沉积源项以及流出物源项。

5.2 裂变产物源项设计流程或步骤如下：

1. 分析堆芯放射性总活度；
2. 分析一回路裂变产物释放率；
3. 分析一回路裂变产物平衡活度浓度及其随反应堆运行时间的变化；
4. 分析一回路内表面沉积源项；
5. 最后分析高温气冷堆核动力厂运行期间的流出物裂变产物源项。
6. 裂变产物源项设计的方法、计算公式、推荐参数或假设条件

6.1 堆芯放射性总活度

6.1.1 在计算高温气冷堆核动力厂的堆芯放射性总活度时，应按如下模型计算：

 （6-1）

(i＝1，…，N)

式中：Xi为第i种核素的原子浓度，cm-3;

λi为第i种核素的衰变常数，s-1;

σi为第i种核素谱平均的中子吸收截面，cm2；

lij为第j种核素衰变成第i种核素的份额；

fik为第k种核素吸收中子后转变为第i种核素的份额；

Φ为按位置、能量平均的中子注量率，n/（cm2·s）。

6.1.2 在计算堆芯放射性总活度时可以采用如下假设：

1. 堆芯成为平衡堆芯后，可以近似认为中子注量率和能谱分布不随时间变化；
2. 空间分布上，由于球床模块式高温气冷堆采用连续换料，功率得到了很好的展平，轴向各层中热中子注量率与快中子注量率的比值基本相同，可以采用不变的中子能谱参数和不变的单群中子反应截面；
3. 在计算时应考虑功率不确定性适当增加一定的保守性。

6.2一回路裂变产物释放率

6.2.1 一回路冷却剂中裂变产物应考虑如下主要来源：

1. 从完整包覆颗粒的释放；
2. 从破损包覆颗粒的释放；
3. 从石墨基体中沾污的重金属（主要是铀污染）裂变导致的释放。

6.2.2 计算裂变产物向一回路的释放率时，应假设燃料元件中产生的裂变产物从燃料元件释放的过程是一个在完整包覆颗粒、破损包覆颗粒和石墨基体这几种介质中的扩散过程。在球坐标系统下扩散方程为：

 （6-2）

其中扩散系数D(T)为：

*D*(*T*)＝*D*o exp(－*q/RT*) （6-3）

式中：*c* ─裂变产物在扩散介质中的浓度，atom/cm3；

*t* ─时间，s；

*r* ─空间坐标，cm；

*Q* ─裂变产物的产生率，atom/(cm3·s)；

λ ─核素的衰变常数，s-1；

*Do* ─扩散频率因子，cm2/s；

*q* ─扩散激发能，J/mol；

*R* ─普适气体常数，J/(mol·K)；

*T* ─绝对温度，K。

相应于球体外表面处的裂变产物浓度服从下列边界条件，即当r＝rp（球体半径）时：



*β*为材料传输系数，cm/s

Crp为球体外表面处裂变产物核素浓度，atom/cm3

Cgr 为球体外环境中裂变产物核素平均浓度，atom/cm3。

利用上述公式，根据燃料元件参数可以计算出燃料元件的放射性裂变产物核素释放速率。

6.3 一回路裂变产物平衡活度

6.3.1 一回路冷却剂中裂变产物的衰减途径主要应考虑核素自身衰变、氦净化系统的净化以及在一回路冷却剂接触的表面上的沉积。

6.2.2 根据裂变产物在一回路的产生途径和衰减途径，可按以下模型计算裂变产物在一回路冷却剂中的活度浓度Ci(t)：

****

（6-4）

式中，Ri裂变产物核素i从堆芯燃料元件的释放率，Bq/s；

V 一回路氦气空间体积，m3；

λi核素i衰变常数，s-1；

Q 进入氦净化系统有效净化单元的净化流量， m3/s；

εi该有效净化单元对核素i的净化效率；

δi一回路氦气每循环一周核素i的沉积率（或称为沉积份额）；

T 一回路氦气每循环一周的时间，s；

ω一回路氦气的泄漏速率，s-1；

σai核素i的中子吸收截面，cm2；

φe堆芯平均有效中子注量率，cm-2⋅s-1；

tv 一回路氦气每次循环通过堆芯的时间，s；

α=可称为有效去除系数，s-1。

6.4 一回路裂变产物沉积源项

在计算裂变产物核素在一回路内表面的沉积时，应参考实验堆和示范电站的设计值和测量值选择合适的沉积率。

6.5 流出物中的裂变产物源项

6.5.1 高温气冷堆核动力厂的气态流出物中裂变产物源项应考虑的主要来源有：

1. 一回路冷却剂系统的泄漏；
2. 氦净化系统再生时的污染氦气释放；
3. 对受放射性污染设备进行保养和检修时的排放；
4. 预计运行事件的排放。

6.5.2 计算一回路冷却剂系统泄漏造成的裂变产物排放源项时，一回路冷却剂的泄漏率应采用保守设计值。

6.5.3 计算氦净化系统低温吸附器再生造成的裂变产物排放源项时，主要考虑的裂变产物核素为惰性气体Kr和Xe的同位素，应针对氦净化系统低温吸附器的再生工艺过程，分析再生过程中排放到废气贮存罐的惰性气体裂变产物量，分析再生结束后残留在低温吸附器再生回路中的惰性气体裂变产物随再生回路残余氦气排放到环境的方式，计算时应考虑氦净化系统的设计参数，如低温吸附器的吸附效率、再生周期、再生所需的时间、再生回路残余氦气压力、体积以及废气贮存罐的贮存时间等。

6.4.5 计算预计运行事件造成的裂变产物排放源项时，可选取一回路安全阀误开启事件和氦净化系统废气贮存罐误开启事件。

6.4.6 计算液态流出物中的裂变产物源项时应根据各类废水产生时的活度浓度、产生量，并考虑对这些废水的处理工艺和排放管理措施。

1. 裂变产物源项计算推荐工具或软件

7.1 堆芯放射性总活度计算软件

计算高温气冷堆核动力厂堆芯放射性总活度时推荐使用KORIGEN软件和NUIT软件。

7.2 一回路源项计算软件

计算高温气冷堆核动力厂裂变产物释放率时推荐使用FRESCO-II程序、PANAMA程序和FRAT程序；计算一回路裂变产物源项时推荐使用LOOP程序和FIST程序。

7.3 流出物源项计算软件

计算高温气冷堆核动力厂流出物的裂变产物源项时推荐使用NORM程序。

参 考 文 献

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |