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2部分：活化产物

Analytic Methods for Radioactive Source Term during Normal Operation in High Temperature Gas Cooled Reactor Nuclear Power Plant, Part 2: Activation 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](#_Toc200036379)

[前言 II](#_Toc200036380)

[1 范围 1](#_Toc200036381)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc200036382)

[3 术语和定义 1](#_Toc200036383)

[3.1 活化产物 activation product 1](#_Toc200036384)

[4 活化产物源项设计的原则 1](#_Toc200036385)

[5 活化产物源项设计的范围和设计流程 2](#_Toc200036386)

[6 活化产物源项设计的方法、计算公式、推荐参数或假设条件 2](#_Toc200036387)

[6.1 一回路活化产物的来源和产生量 2](#_Toc200036388)

[6.2 一回路活化产物平衡活度 2](#_Toc200036389)

[6.3 一回路活化产物沉积源项 3](#_Toc200036390)

[6.4 流出物中的活化产物源项 3](#_Toc200036391)

[7 活化产物源项计算推荐工具或软件 3](#_Toc200036392)

[7.1 一回路活化产物源项计算软件 3](#_Toc200036393)

[7.2 流出物源项计算软件 4](#_Toc200036394)

[参 考 文 献 5](#_Toc200036395)

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2部分：活化产物

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活化源项设计与分析，包括一回路活化产物源项、一回路内表面活化产物沉积源项以及流出物源项。

本标准主要是为高温气冷堆核动力厂运行工况活化产物源项设计提供一套规范化的设计原则、设计流程、计算方法和推荐的分析程序及其输入参数。

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。

3.1 活化产物  activation product

活化产物，是指在中子照射下发生活化反应变得具有放射性的物质，一回路冷却剂及其杂质、控制棒以及结构材料等都是活化产物的来源。

1. 活化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活化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：活化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：活化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、包络可能导致更多活化产物产生和释放的运行工况，并保留一定的安全裕度。

1. 活化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要重点分析的活化产物源项包括：一回路活化产物源项、一回路内表面放射性沉积源项以及流出物源项。

5.2 活化产物源项设计流程或步骤如下：

1. 分析一回路活化产物的来源和产生量；
2. 分析一回路活化产物平衡活度浓度及其随反应堆运行时间的变化；
3. 分析一回路内表面沉积源项；
4. 最后分析高温气冷堆核动力厂运行期间的流出物活化产物源项。
5. 活化产物源项设计的方法、计算公式、推荐参数或假设条件

6.1 一回路活化产物的来源和产生量

6.1.1 高温气冷堆核动力厂一回路氦气中的活化产物来源应考虑氦气自身成分的活化、氦气中杂质元素的活化以及燃料元件石墨基体材料及其杂质的活化。

6.1.2 在计算燃料元件石墨基体材料及其杂质的活化产物进入一回路时，应合理选择石墨磨蚀或者腐蚀进入一回路的速率。

6.1.3 单位体积材料内活化产物i的产生率Bi（原子数/(m3⋅s)）可由以下公式计算：

 （6-1）

其中，ρ为材料密度（g/m3），fn为靶核素的天然丰度，fm为靶核元素在材料中的质量份额，A0为阿伏伽德罗常数，μ为靶核元素摩尔质量（g/mol），σ为靶核素的活化截面（cm2），Φ为中子注量率（原子数/(cm2⋅s)），如果是热中子活化，则取热中子注量率；如果是快中子活化，则取快中子注量率。

6.1.4 3H和14C是高温气冷堆核动力厂运行时产生的两种特殊活化产物，具体分析方法见本标准的第3部分和第4部分。

6.1.5 在计算燃料元件基体石墨中的活化产物比活度时，应保守选取活化时间为燃料元件在反应堆内的平均滞留时间。计算时应根据杂质含量控制要求选取合适的基体石墨杂质含量。

6.1.6 在高温气冷堆核动力厂运行初期，新燃料元件石墨基体孔隙中大量的40Ar杂质在中子照射下发生40Ar(n,γ)41Ar反应产生41Ar，应考虑合适的41Ar释放进入一回路的速率并保守估计一回路41Ar活度浓度。

6.1.7 在计算高温气冷堆正常运行时的气载流出物源项时，应考虑安全壳空气中40Ar受到从反应堆压力容器逸出的中子作用而活化产生的41Ar。

6.2 一回路活化产物平衡活度

6.2.1 一回路冷却剂中活化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 根据活化产物在一回路的产生途径和衰减途径，可按以下模型计算活化产物在一回路冷却剂中的活度浓度Ci(t)：

****

（6-2）

其中，Ri 活化产物核素i进入一回路的释放率，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。

6.3 一回路活化产物沉积源项

在计算活化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。

6.4 流出物中的活化产物源项

6.4.1 高温气冷堆核动力厂的气载流出物活化产物源项应考虑的主要来源有：

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

6.4.2 计算安全壳中空气的活化时，应考虑负压排风系统的换气速率，根据反应堆物理分析和屏蔽分析提供的中子注量率计算41Ar在安全壳中的平衡活度。

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

6.4.4 计算氦净化系统分子筛再生造成的活化产物排放源项时，主要考虑的活化产物核素为3H和14C，应针对氦净化系统分子筛再生工艺过程，分析再生结束后残留在分子筛再生回路中的3H和14C随再生回路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，如氧化铜床的转换效率、分子筛床吸附效率、分子筛再生周期、再生所需的时间、再生时冷凝收集含氚水的效率、再生回路氦气压力、体积以及含气态3H和14C的份额等。

6.4.5 计算预计运行事件造成的活化产物排放源项时，可选取一回路安全阀误开启事件。

6.4.6 计算液态流出物中的活化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. 活化产物源项计算推荐工具或软件

7.1 一回路活化产物源项计算软件

计算高温气冷堆核动力厂一回路活化产物源项时推荐使用LOOP程序和FIST程序。

7.2 流出物源项计算软件

计算高温气冷堆核动力厂流出物的活化产物源项时推荐使用NORM程序。

参 考 文 献

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