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3部分：3H

Analytic Methods for Radioactive Source Term during Normal Operation in High Temperature Gas Cooled Reactor Nuclear Power Plant, Part 3: 3H

|  |
| --- |
| 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](#_Toc200015445)

[前言 II](#_Toc200015446)

[1 范围 1](#_Toc200015447)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc200015448)

[3 术语和定义 1](#_Toc200015449)

[4 3H源项设计的原则 1](#_Toc200015450)

[5 3H源项设计的范围和设计流程 1](#_Toc200015451)

[6 源项设计的方法、计算公式、推荐参数或假设条件 2](#_Toc200015452)

[6.1 一回路3H源项的来源和产生量 2](#_Toc200015453)

[6.2 一回路3H平衡活度 2](#_Toc200015454)

[6.3 二回路3H源项 3](#_Toc200015455)

[6.4 三回路3H源项 4](#_Toc200015456)

[6.5 流出物3H源项 4](#_Toc200015457)

[7 3H源项计算推荐工具或软件 4](#_Toc200015458)

[7.1 一回路3H源项计算软件 4](#_Toc200015459)

[7.2 流出物3H源项计算软件 4](#_Toc200015460)

[参 考 文 献 4](#_Toc200015461)

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3部分：3H

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3H（氚）源项设计与分析，包括一回路3H的产生、迁移和向环境的排放等。

本标准主要是为高温气冷堆核动力厂运行工况3H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

本文件没有需要界定的术语和定义。

1. 3H源项设计的原则

**4.1** 高温气冷堆核动力厂运行工况的3H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：3H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：3H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3H产生和释放的运行工况，并保留一定的安全裕度。

1. 3H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3H源项包括：一回路3H源项、二回路3H源项、三回路3H源项以及流出物中的3H源项。

**5.2** 3H源项设计流程或步骤如下：

1. 分析一回路3H源项的来源和产生量；
2. 分析一回路3H的平衡活度浓度及其随反应堆运行时间的变化；
3. 分析3H从一回路向二回路的渗透，计算二回路中的3H活度浓度；
4. 针对高温气冷堆的某些用途（如供热/供汽），分析3H从二回路向三回路的渗透，计算三回路中的3H活度浓度；
5. 最后分析高温气冷堆核动力厂运行期间的流出物3H源项。
6. 源项设计的方法、计算公式、推荐参数或假设条件
   1. 一回路3H源项的来源和产生量

6.1.1 高温气冷堆核动力厂运行工况下一回路3H的来源应主要考虑堆芯核燃料的三裂变以及某些轻元素的中子活化反应。

6.1.2 在计算三裂变产生的3H时，需对堆芯燃耗做保守考虑，合理增加三裂变产3H的速率。

6.1.3 在计算三裂变产生的3H向一回路的释放时，完好包覆颗粒、破损包覆颗粒和铀污染应区别对待；应保守假设破损包覆颗粒和基体石墨铀污染三裂变产生的3H完全释放到一回路。

6.1.4 高温气冷堆核动力厂运行工况下的产3H活化反应至少应包括如下几项：

1. 3He(n, p)3H
2. 6Li(n,α)3H
3. 7Li(n, nα)3H
4. 10B(n, 2α)3H

6.1.5 计算Li杂质活化产生的3H时，应考虑燃料元件基体石墨、反射层石墨以及碳砖，Li杂质含量应根据杂质含量控制要求取保守的设计值。

6.1.6 计算石墨中Li杂质活化产生的3H向一回路的扩散释放时，应适当考虑温度对3H扩散和吸附的影响。应保守假设燃料元件基体石墨和较高温区域反射层石墨中Li杂质活化产生的3H都能快速进入一回路氦冷却剂中，不考虑高温石墨对3H的吸附作用。

6.1.7 计算Li杂质活化产生的3H源项时，应考虑石墨材料中Li杂质靶核的耗减，不仅要分析平衡堆芯的3H源项，而且要分析高温气冷堆核动力厂运行初期的3H源项。

6.1.8 计算硼活化产生的3H源项时，除了应考虑燃料元件基体石墨、反射层石墨、非含硼碳砖中的硼杂质以及含硼碳砖中的硼外，应重点考虑控制棒吸收体（通常为B4C）。

6.1.9 计算控制棒吸收体产生的3H源项时应根据中子注量率的计算结果将吸收体分成若干个分区，并根据吸收体的硼含量计算产3H量。此外，还应根据控制棒包壳的设计来确定3H向一回路的释放率，具体建议按如下方式分析：如果控制棒设有透气孔，即与一回路气氛相连通，则应保守认为该途径产生的3H都快速进入一回路氦冷却剂中；如果控制棒包壳是密闭承压的，则应根据控制棒包壳材料和结构参数计算3H向一回路的渗透速率。

* 1. 一回路3H平衡活度

6.2.1 一回路氦冷却剂中3H的衰减途径主要应考虑氦净化系统的净化、一回路冷却剂的泄漏、3H通过蒸汽发生器传热管壁向二回路的扩散以及3H自身的衰变。

6.2.2 根据3H在一回路的产生途径和衰减途径，可按以下计算模型计算3H在一回路冷却剂中的总量*NT*：

（6-1）

其中，*R(X,En)*为燃料三裂变产生的3H单位时间内释放到一回路冷却剂中的原子数，s-1，*RHe3*为单位时间内由氦冷却剂中3He中子活化反应产生的3H原子数，s-1；*RLi6*为单位时间内由燃料元件基体石墨及石墨反射层中的6Li经中子活化反应产生的3H原子数（假设该途径产生的3H瞬时释放到一回路冷却剂中），s-1；*RLi7*为单位时间内由燃料元件基体石墨及石墨反射层中的7Li经中子活化反应产生的3H原子数（假设该途径产生的3H瞬时释放到一回路冷却剂中），s-1；*RB10*为单位时间内由控制棒、燃料元件基体石墨及石墨反射层中的10B经中子活化反应产生的3H原子数（假设该途径产生的3H瞬时释放到一回路冷却剂中），s-1；*λ*是核素3H的衰变常数，s-1；*ω*是一回路氦冷却剂的泄漏速率，s-1；*P*是氦净化系统对3H的净化速率，s-1；*L1to2*是3H通过蒸汽发生器传热管向二回路的渗透率，s-1。

* 1. 二回路3H源项

6.3.1 应充分考虑蒸汽发生器传热管温度高以及3H能在高温下穿透金属（渗透）的性能，重点分析一回路冷却剂中的氚向二回路的渗透。

6.3.2 应根据高温气冷堆核动力厂蒸汽发生器传热管采用的材料（如2.25Cr-1Mo和Incoloy800H等），选取经验证的扩散参数或渗透率计算3H通过蒸汽发生器传热管向二回路的渗透。

6.3.3 对2.25Cr-Mo传热管段可采用如下公式计算3H扩散系数D[m2⋅s-1]：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6-2） |

其中，R为理想气体常数，J·mol-1·K-1；T为传热管计算位置处的绝对温度，K。

6.3.4 对3H在Incoloy800中的渗透率K[m3(STP) ·m-1·s-1·Pa-0.5]，可采用以下公式计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | （6-3） |

渗透速率R [m3(STP) /s]可按下式计算：

 （6-4）

其中，

ri、ro为传热管内外半径，S为传热面积，PHT,h和PH2,h分别为一次侧3H（主要以HT形式存在）和H2的分压。

6.3.5 可参考公式6-2~公式6-4，结合蒸汽发生器传热管的几何参数和温度分布，计算3H从一回路向二回路的渗透速率，计算时可适当考虑二次侧氧化膜对3H的阻挡作用。

6.3.6 最终二回路水中3H的浓度CH-3(t)(Bq/kg)可以按下式推算：

（6-5）

其中，A1to2为一回路中氚向二回路的泄漏率，(Bq/h)，可根据一回路冷却剂中3H的活度浓度设计值以及6.3.3~6.3.5条款计算得到的3H渗透速率推算得到；δ 为二回路水更换率，(kg/h)；M为二回路总水量，(kg)；t为时间，(h)。

* 1. 三回路3H源项

6.4.1 考虑到有供热需求的高温气冷堆核动力厂可能会设置三回路（供热/供汽回路），计算三回路源项时应主要考虑二回路中的3H向三回路的泄漏。

6.4.2 考虑到三回路中3H主要来源于二回路与三回路之间的换热器微泄漏，在计算时应合理选取换热器的泄漏率设计值。

6.4.3 在计算三回路中3H源项时，可以保守假设二回路中的3H活度浓度一直维持平衡活度浓度，再结合三回路蒸汽参数，按照公式6-5相同的方法计算三回路3H的活度浓度。

* 1. 流出物3H源项

6.5.1 高温气冷堆核动力厂的气态流出物3H源项应考虑的主要来源有：

1. 一回路冷却剂系统的泄漏；
2. 氦净化系统分子筛再生时的释放；
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；
5. 二回路抽真空排气。

6.5.2 计算一回路冷却剂系统泄漏造成的3H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 计算氦净化系统分子筛再生造成的3H排放源项时，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、再生回路氦气含气态3H的份额等。

6.5.4 计算预计运行事件造成的3H排放源项时，可选取一回路安全阀误开启事件。

6.5.5 计算二回路抽真空排气造成的3H排放源项时，应根据二回路水蒸汽的排放速率和二回路氚活度浓度设计值进行计算。

6.5.6 在计算液态流出物3H源项时，应主要考虑二回路泄漏排放的含氚废水，并注意不要超过3H从一回路到二回路的设计泄漏量。

1. 3H源项计算推荐工具或软件
   1. 一回路3H源项计算软件

计算高温气冷堆核动力厂一回路3H源项时推荐使用LOOP程序和FIST程序。

* 1. 流出物3H源项计算软件

计算高温气冷堆核动力厂流出物3H源项时推荐使用NORM程序。

参 考 文 献

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