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4部分：14C

Analytic Methods for Radioactive Source Term during Normal Operation in High Temperature Gas Cooled Reactor Nuclear Power Plant, Part 4: 14C

|  |
| --- |
| 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](#_Toc200025536)

[前言 II](#_Toc200025537)

[1 范围 1](#_Toc200025538)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc200025539)

[3 术语和定义 1](#_Toc200025540)

[4 14C源项设计的原则 1](#_Toc200025541)

[5 14C源项设计的范围和设计流程 1](#_Toc200025542)

[6 14C源项设计的方法、计算公式、推荐参数或假设条件 2](#_Toc200025543)

[6.1 一回路14C源项的来源和产生量 2](#_Toc200025544)

[6.2 一回路14C平衡活度 3](#_Toc200025545)

[6.3 流出物14C源项 3](#_Toc200025546)

[7 14C源项计算推荐工具或软件 4](#_Toc200025547)

[7.1 一回路14C源项计算软件 4](#_Toc200025548)

[7.2 流出物14C源项计算软件 4](#_Toc200025549)

[参 考 文 献 4](#_Toc200025550)

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：14C

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14C源项设计与分析，包括一回路14C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14C源项设计提供一套规范化的设计原则、设计流程、计算方法、推荐或假设的设计参数以及分析程序。

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. 14C源项设计的原则

**4.1** 高温气冷堆核动力厂运行工况的14C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：14C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：14C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14C产生和释放的运行工况，并保留一定的安全裕度。

1. 14C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14C源项包括：一回路14C源项和流出物中的14C源项。

**5.2** 14C源项设计流程或步骤如下：

1. 分析一回路14C源项的来源和产生量；
2. 分析一回路14C的平衡活度浓度；
3. 分析高温气冷堆核动力厂运行期间的流出物14C源项。
4. 14C源项设计的方法、计算公式、推荐参数或假设条件
   1. 一回路14C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产生14C的活化反应至少应包括如下几项：

1. 14N(n,p)14C
2. 13C(n,γ)14C
3. 17O (n,α)14C

6.1.2 考虑到高温气冷堆一回路用高纯氦气作冷却剂，杂质O含量极小，一回路氦冷却剂中由17O活化产生14C的贡献可以忽略。UO2燃料颗粒中含有O，其中17O活化产生14C基本上滞留在燃料核芯中，可适当考虑以气态形式从破损燃料颗粒进入一回路冷却剂中。

6.1.3 在高温气冷堆核动力厂中，由于有大量的石墨，从而有大量13C，应分析堆芯中石墨活化产生的14C，并分析此种途径产生的14C在燃料元件基体石墨和石墨反射层中的分布以及可能释放到一回路氦冷却剂中的方式和份额。

6.1.4 考虑到高温气冷堆平衡堆芯需不断补充新燃料元件，应重点分析由燃料元件基体石墨中氮杂质的中子活化反应14N(n,p)14C产生的14C。

6.1.5 因为氮杂质一般位于石墨基体微孔隙中或吸附于石墨晶粒的表面（或称为晶粒边界），因此可假设活化产生的14C基本位于石墨晶粒的表面。

6.1.6 应分析燃料元件基体石墨或反射层石墨中产生的14C进入一回路冷却剂的途径及化学形式。主要有两种途径，一是燃料元件或反射层表面石墨的磨蚀，呈石墨粉尘形式；另一是石墨被氧化性气体腐蚀生成气体产物从而进入一回路冷却剂中。

6.1.7 分析以石墨粉尘形式存在的14C时，需考虑产生石墨磨蚀的各种主要形式：球形燃料元件在堆芯流动过程中的相互摩擦、堆芯最外围燃料元件与石墨反射层表面的接触摩擦以及燃料元件在燃料装卸系统管道中输运时发生的磨蚀。磨蚀产生的石墨粉尘量应参考国内外球床堆的运行经验以及相关实验成果进行保守估计。

6.1.8 分析以石墨氧化腐蚀产物形式存在的14C时，应综合考虑石墨材料（燃料元件基体石墨、反射层石墨和碳砖）所处位置的中子注量率、温度以及石墨材料与氧化性气体杂质接触的表面积。中子注量率决定了活化反应产生14C的速率，后二者则影响腐蚀反应的速率。如外围石墨反射层和碳砖温度较低，腐蚀反应生成气体产物的速率低，则可以认为其中活化产生的14C全部以固态形式留存在结构石墨中，进入一回路冷却剂中的量可以忽略不计。

6.1.9 考虑到新燃料元件装入堆芯前在装料暂存装置要进行抽真空的操作，应分析此过程对燃料元件减少N杂质吸附的影响。

6.1.10 应基于燃料元件基体石墨孔隙结构特征、辐照特性以及石墨腐蚀机理等实验及理论成果，合理构建N杂质活化产生14C并形成一回路14C源项的分析模型，分析该途径14C源项时可按如下假设：

(1) 燃料元件N杂质主要集中在石墨基体孔隙中（包括孔隙表面）；

(2) 新燃料元件石墨基体孔隙率为24%，其中开孔与闭孔各占一半；

(3) 抽真空使新燃料元件石墨基体开孔孔隙中空气分压降低到300Pa（N分压237Pa），此时开孔中N杂质占燃料元件质量份额约为0.2ppm；

(4) 新燃料元件石墨基体闭孔中没有氧气，N杂质不能被抽出，N分压维持7.9×104Pa；

(5) 新燃料元件投入堆芯后，其开孔中N杂质分压将迅速与一回路冷却剂氦中N分压达到平衡，使开孔中N杂质含量进一步降低；

(6) 活化反应考虑燃料元件孔隙中N杂质的活化、燃料元件石墨C的活化、一回路He中N的活化；

(7) 14C要以气态流出物形式释放，须形成气体产物；燃料元件释放14C的主要途径为石墨腐蚀，腐蚀产物的主要形式是CO，CO分压可作为石墨腐蚀的度量；

(8) 计算腐蚀量时，CO浓度（分压）采用设计值；

(9) 燃料元件石墨腐蚀主要发生在开孔表面，12C、13C、14C具有相同的腐蚀速率；

(10) 少量闭孔打开后，表面腐蚀速率与原来的开孔相同，但应考虑闭孔打开前14C的积累；

(11) 孔隙中N杂质活化产生的14C在孔隙表面均匀分布，表面腐蚀的份额即为14C生成气态产物的份额，也即为14C通过气态途径释放的份额。

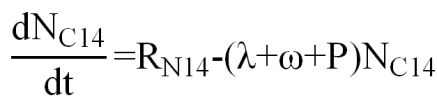
6.1.11 对于反应堆运行后燃料元件基体石墨由于辐照效应导致闭孔变开孔的份额，应在充分调研实验数据的基础上进行保守假设，应包络辐照到深燃耗下闭孔的孔隙率减小情况，并保留一定裕度。通常可在源项计算时保守考虑反应堆运行后有1/3的闭孔变开孔。

6.1.12 源项分析时假设燃料元件基体石墨闭孔打开后，其中的N2将与一回路氦气气氛联通，在较短时间内与一回路N2的分压达到平衡，从而在随后的辐照过程中仅仅是低浓度的N2杂质活化，14C的产生量将大大减小；闭孔打开得越早，14C的产生量将越小；如果燃料在堆芯辐照的整个寿命期间，闭孔不打开，则闭孔中N2的分压始终维持7.9×104Pa，产生的14C量将达到最大，但对一回路14C源项不造成贡献。

* 1. 一回路14C平衡活度

6.2.1 一回路氦冷却剂中14C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以及14C自身的衰变。

6.2.2 根据14C在一回路的主要产生途径和衰减途径，可按以下计算模型计算14C在一回路冷却剂中的总量*NC14*：

 （6-1）

其中，RN14为单位时间内由燃料元件基体石墨中的14N经中子活化反应产生并释放到一回路的14C原子数，s-1；*λ*是14C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14C的净化速率，s-1。RN14的计算公式如下：

 （6-2）

其中，NF为堆芯燃料球数；fop为燃料球中开孔体积份额；VF为每个燃料球的体积，m3；PNO为开孔中N的分压，Pa；fcp为燃料球中闭孔体积份额；PNC为闭孔中N的分压，Pa；fc-o为燃料球中闭孔变开孔的份额；R为理想气体常数，J·mol-1·K-1；T为堆芯平均温度，K；fn为14N的丰度；A0为阿伏伽德罗常数；σ为14N (n,p)14C的热中子反应截面，cm2；φ为堆芯平均热中子注量率，n/(cm2⋅s)；fer为微孔表面腐蚀份额。

* 1. 流出物14C源项

6.3.1 高温气冷堆核动力厂的气态流出物14C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。

6.3.2 计算一回路冷却剂系统泄漏造成的14C排放源项时，一回路冷却剂的泄漏率应采用保守设计值。

6.3.3 计算氦净化系统分子筛再生造成的14C排放源项时，应针对氦净化系统分子筛再生工艺过程，分析再生结束后分子筛再生回路中的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、分子筛再生周期等。一般应假设一回路氦通过氦净化系统时，气态14C全部转换为14CO2，并全部被氦净化系统分子筛吸附；分子筛再生时，其吸附的14CO2全部解吸附并随再生回路氦气排放到环境。

6.3.4 计算预计运行事件造成的14C排放源项时，可选取一回路安全阀误开启事件。

6.3.5 分析液态流出物14C源项时，应考虑到高温气冷堆核动力厂在运行及检修期间，与一回路系统相邻的设备及其冷却水可能会被一回路可沉积放射性物质（气溶胶）污染，而进一步由设冷水的管道、阀门等泄漏进入核疏水系统。

6.3.6 可能含14C的放射性废液主要包括：实验室排放的化学废水、集水坑和泄漏的废水、来自去污间的废水和设备去污及地面冲洗废水、系统工艺排水（设冷水）、淋浴及卫生间排水等。

6.3.7 由于废液中的14C仍然以固态形式存在于石墨颗粒中，在计算液态流出物源项时通常假设放射性废液处理系统的过滤器对14C的过滤效率为100%，因此可认为正常运行时高温气冷堆核动力厂的液态流出物中不含14C。

1. 14C源项计算推荐工具或软件
   1. 一回路14C源项计算软件

计算高温气冷堆核动力厂一回路14C源项时推荐使用LOOP程序和FIST程序。

* 1. 流出物14C源项计算软件

计算高温气冷堆核动力厂流出物14C源项时推荐使用NORM程序。

参 考 文 献

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