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一回路惰性气体放射性

核素测量技术要求

Technical requirements for noble gas radionuclides measurement in the primary circuit of high temperature gas-cooled reactor nuclear power plant

|  |
| --- |
| 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](#_Toc199432762)

[前  言 II](#_Toc199432763)

[1 范围 1](#_Toc199432764)

[2 规范性引用文件 1](#_Toc199432765)

[3 术语和定义 1](#_Toc199432766)

[3.1 标定 Calibration 1](#_Toc199432767)

[3.2 特征峰 Characteristic Peak 1](#_Toc199432768)

[3.3 全能峰 Full Energy Peak 1](#_Toc199432769)

[3.4 效率刻度 Efficiency Calibration 1](#_Toc199432770)

[3.5 能量刻度 Energy Calibration 1](#_Toc199432771)

[3.6 探测效率 Detection Efficiency 1](#_Toc199432772)

[3.7 活度浓度 Activity Concentration 1](#_Toc199432773)

[4 总述 2](#_Toc199432774)

[4.1 目的和功能 2](#_Toc199432775)

[4.2 设计原则 2](#_Toc199432776)

[4.3 主要技术参数 2](#_Toc199432777)

[5 主要设备 2](#_Toc199432778)

[6 测量方法及流程 2](#_Toc199432779)

[6.1 在线连续监测方法及流程 2](#_Toc199432780)

[6.2 一回路氦气取样流程 3](#_Toc199432781)

[6.3 取样样品分析方法 3](#_Toc199432782)

[7 测量要求 6](#_Toc199432783)

[8 注意事项 6](#_Toc199432784)

[9 质量保证和控制 6](#_Toc199432785)

[参 考 文 献 7](#_Toc199432786)

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，华能山东石岛湾核电有限公司。

本标准主要起草人：谢锋，王彧，姚峰，魏利强，曹建主，李富，王海涛，董玉杰，张作义，周耀权，高旭，陈景，石琦，马倩，陈曦，贾永胜，张钰麟，刘猛。

高温气冷堆核动力厂一回路惰性气体放射性核素测量技术要求

1. 范围

本文件规定了球床式高温气冷堆（以下简称：高温气冷堆）核动力厂一回路惰性气体放射性核素测量的技术要求，包括目的和功能、主要设备、测量方法及流程、测量要求和注意事项等。

本文件适用于高温气冷堆核动力厂一回路惰性气体放射性核素测量的技术要求。

1. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| GB 18871 | 电离辐射防护与辐射源安全基本标准 |  |
| HAF 003 | 核电厂质量保证安全规定 |  |

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

* 1. 标定 Calibration

指在一定探测条件下通过使用标准计量仪器对特定仪器或系统的精度进行检测和校准的过程，旨在消除系统误差并提高测量精度。

* 1. 特征峰 Characteristic Peak

指在γ谱中由核素衰变释放出的具有特定能量的γ射线形成的谱峰。

* 1. 全能峰 Full Energy Peak

指在探测器中，射入的γ射线的全部能量直接被吸收形成的谱峰。

* 1. 效率刻度 Efficiency Calibration

指建立给定测量条件下γ射线能量与其全能峰探测效率的对应关系的过程。

* 1. 能量刻度 Energy Calibration

指建立给定测量条件下入射粒子的能量与多道分析器的道数之间对应关系的过程。

* 1. 探测效率 Detection Efficiency

指在一定探测条件下测到的电离辐射粒子数，与在同一时间间隔内由辐射源发射出的该种粒子总数的比值。

* 1. 活度浓度 Activity Concentration

指放射性核素单位体积的放射性强度。

1. 总述
   1. 目的和功能

高温气冷堆是第四代先进核能系统的一种，不同于压水堆，其堆芯采用TRISO包覆颗粒球形燃料元件、氦气作为一回路冷却剂、石墨作为反射层及结构材料，高温气冷堆堆芯及一回路放射性核素的类型、活度水平、输运行为及分布等与压水堆具有明显差异。由于固体放射性核素（包括裂变产物和活化产物）容易沉积在一回路管道设备的内表面，因此高温气冷堆一回路源项中惰性气体放射性核素（包括裂变产物和活化产物）占有重要比例。通过测量一回路中典型惰性气体放射性核素的活度浓度，可以了解和掌握堆芯燃料元件的性能，对于高温气冷堆的辐射安全评价具有重要意义。

为了掌握高温气冷堆核动力厂一回路惰性气体放射性核素类型和活度浓度，结合高温气冷堆的设计特点，在一回路氦净化系统入口阀门前设置了在线式高量程γ监测仪，一回路氦净化系统低温吸附器后设置了在线式低量程γ监测仪，用于连续监测高温气冷堆一回路总放射性水平和氦净化系统的净化效率。同时，为了精确掌握高温气冷堆一回路中惰性气体核素的类型及其活度浓度，在氦净化系统入口阀门前、尘埃过滤器后和低温吸附器后设置了取样管路，配合集气罐及高纯锗γ谱仪，可以获得正常工况及事故情形下一回路氦气中典型惰性气体放射性核素的类型及活度浓度。

* 1. 设计原则

测量对象为一回路惰性气体放射性核素，不影响反应堆的安全运行，为非安全级系统及设备、常规抗震、工业质保等级。若被测管道有抗震要求，在线监测设备抗震要求与被测管道一致，质保等级需调整为QA3。但需根据GB18871的相关规定，做好充分的辐射防护。

* 1. 主要技术参数

主要技术参数要求如下：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 在线式高量程γ监测仪： | 相对误差：≤ ±20%（参考核素：137Cs）； |
|  | 在线式低量程γ监测仪： | 相对误差：≤ ±20%（参考核素：137Cs）； |
|  | 集气罐： | 容积不小于1L，需考虑罐体承受压力； |
|  | 高纯锗γ谱仪： | 能量分辨率：≤2.5keV@60Co 1.33MeV。 |

1. 主要设备

针对一回路惰性气体放射性核素测量的设备如下：

1. 在线式高量程γ监测仪；
2. 在线式低量程γ监测仪；
3. 集气罐、减压阀、过滤器、调节阀、仪表等；
4. 高纯锗γ谱仪。
5. 测量方法及流程
   1. 在线连续监测方法及流程

对氦净化系统入口和出口处一回路氦气冷却剂总γ放射性水平进行监测，采用在线连续监测方式，将探测器安装在主管道外侧，不破坏一回路管道的完整性。在氦净化系统正常净化列入口隔离阀之前，设置在线式高量程γ监测仪对一回路氦气冷却剂总γ放射性水平进行在线连续监测，可反映一回路氦气中放射性的整体水平，结合取样测量数据，可以给出一回路氦气中放射性核素类型、活度及堆芯燃料元件性能信息，对保障反应堆的安全运行非常重要。在线式高量程γ监测仪主要用于反应堆正常运行工况和在燃料元件可能出现较多破损引起一回路氦气放射性水平较高事故情况下的监测。氦净化系统处于运行状态，无论是正常净化列或事故冷却除湿列，只要主管道一回路冷却剂能够流动，在线式高量程γ监测仪的连续监测就可以反映一回路氦气中放射性的整体水平，从而提供堆芯燃料元件总体性能信息。

氦净化系统出口正常净化列低温吸附器之后，设置在线式低量程γ监测仪，对一回路氦气冷却剂总γ放射性进行连续监测。同时监测氦净化系统入口和出口处的氦气冷却剂总γ放射性，可以实时获得氦净化系统的运行状况和净化效率信息。

* 1. 一回路氦气取样流程

从氦净化系统正常净化列入口阀门之前、尘埃过滤器之后、正常净化列出口低温吸附器之后，设置取样管路定期取样，送至放化实验室使用高纯锗γ谱仪进行详细的核素分析和各核素的活度测量。通过对氦净化系统正常净化列入口氦气中不同半衰期惰性气体核素的活度测量，可了解各种核素在一回路活度中所占比例，进一步理解气体核素从燃料元件（尤其是破损燃料元件）释放的行为机理和释放速率，更好地推断燃料元件性能。对氦净化系统正常净化列低温吸附器之后，一回路氦气中惰性气体核素活度浓度的测量，并与氦净化系统正常净化列入口测量结果比对，可获得氦净化系统正常净化列对放射性核素的净化效率。

在正常净化列入口阀门之前、尘埃过滤器之后以及正常净化列出口低温吸附器之后设置取样管路，一回路氦气经减压阀、过滤器和调节阀等部件接入集气罐。将集气罐下游的截止阀关闭即可将取样气体收集至罐中，由取样管路上的压力仪表监测集气罐压力，取样样品送至放化实验室进行核素γ谱分析。此外，集气罐前后的截止阀可打开，对管路和集气罐进行吹扫，使集气罐的取样气体更具有代表性。

氦净化系统正常净化列入口阀门之前所引出的取样管路，仅当氦净化系统正常净化列停止运行，事故冷却除湿列投入运行时使用。

反应堆运行期间或停堆期间，可利用取样管路定期将氦净化系统中某测点的氦气收集到集气罐中，可同时用几个集气罐收集各取样点的氦气，记录取样完毕的时间，然后将集气罐送至放化实验室，用高纯锗γ谱仪对罐内气体进行放射性核素活度的测量及核素类型分析。

取样频率可视需要确定，一般在反应堆功率提升阶段和总γ测量结果显示出较大变化时，取样频率可加大，例如1天1次；而在反应堆稳态运行、总γ测量结果趋势平稳时，取样频率可减小，例如7天1次。

* 1. 取样样品分析方法

在一定功率稳定运行时间下，从一回路冷端抽取冷却剂氦气进行取样测量，可以得到相应的一回路气体核素γ谱图。一回路活度浓度实验测量数据的分析主要包括γ谱图分析和核素活度浓度修正。前者可以分析得到实验样品罐中的放射性核素的活度浓度，后者通过抽样时间、测量时间和密度等修正，由取样罐中核素的活度浓度计算得到一回路氦气中核素的活度浓度。

6.3.1 γ谱图分析

**能量标定**

采取能量刻度的方式进行准确有效的能量标定，需选择一个样品中活度足够大且具有许多强度较大的特征γ射线能量峰的核素，并尽可能覆盖高纯锗探测器的整个能量范围。基于此，选择88Kr作为用于能量刻度的核素：88Kr在一回路冷却剂中的含量足够大；88Kr具有足够多且强度较大的γ射线特征峰，能覆盖高纯锗探测器的测量范围（3~3000keV），如表1。

**表1 88Kr发射的γ射线能量和相对强度（>1%）**

|  |  |
| --- | --- |
| γ射线能量(keV) | 强度(%) |
| 2392.11 | 34.60 |
| 196.30 | 26.00 |
| 2195.84 | 13.20 |
| 834.83 | 13.00 |
| 1529.77 | 10.90 |
| 2029.84 | 4.53 |
| 2035.41 | 3.74 |
| 2231.77 | 3.39 |
| 165.98 | 3.10 |
| 362.23 | 2.25 |
| 1518.39 | 2.15 |
| 27.51 | 1.94 |
| 1369.50 | 1.48 |
| 985.78 | 1.31 |
| 1141.33 | 1.28 |
| 1250.67 | 1.12 |
| 1179.51 | 1.00 |

**效率标定**

能量标定和效率标定可分开进行，也可同时进行；可使用相同核素，也可使用不同核素，但两者对于γ谱图分析都是必不可少的。本标准使用效率刻度的方式进行效率标定。考虑短寿命裂变气体发射相应γ射线的范围和分布，基于聚氨酯发泡材料，利用核素241Am、57Co、154Eu、133Ba、109Cd、88Y、152Eu、137Cs、60Co和22Na（能量范围80~1800keV）分别制成混合核素的体标准源，对高纯锗γ谱仪进行综合效率刻度，确定在多种核素存在的实际情况下混合核素体源相应的探测效率。

将效率校准源（刻度源）置于探测器端帽上，与探测器中心轴线对齐，获取谱数据，使被测γ射线的全能峰净峰面积计数不小于40000，计算能量为E的γ射线全能峰净计数率*n*(*E*)。在相同测量条件下，获取本底样品谱数据，计算能量为E的峰位处本底净计数率*nb*(*E*)。全能峰探测效率按(1-1)计算：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1‑1) |

其中，*I*(*E*)为能量为*E*的γ射线的发射几率，*As*为刻度源活度。

利用标准源的全能峰能量和效率，按公式(1-2)进行自然对数多项式拟合，保留足够的有效数位。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1‑2) |

其中，为探测器的绝对探测效率，*bi*为自然对数多项式第*i*项拟合因子，*E*为发射的γ射线能量。

**核素识别**

γ谱图分析中的核素识别主要是通过谱图中识别出的峰值能量与核数据库（γ谱图专业软件中内置核数据库或IAEA核数据库）中的已知数据进行比对。每种核素γ射线具有特定的能量，在一定能量误差范围内，同一个峰值能量可能与多种不同核素的不同γ射线能量对应。这种情况下，需要对比全谱能量区间内谱图的峰值能量，考虑集气罐中可能存在的核素，进行综合判断。

6.3.2 一回路活度浓度修正

所有γ谱图谱峰经能量标定、效率标定和核素识别后，用以计算集气罐中核素的活度浓度，通过抽样时间和密度比修正得到一回路核素的活度浓度。由谱峰的净峰面积计算集气罐中核素的活度浓度：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1‑3) |

其中，*as*是集气罐中核素的活度浓度，*Cnet*是谱峰的净峰面积计数，等于谱峰总峰面积计数减去本底计数，*Iγ*是特定核素能量峰的发射概率，*t*是测量样品谱峰的时间，*V*是样品的体积，*f1*是探测器测量过程中被探测核素自身衰变引起的误差修正因子：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1‑4) |

如(1-5)式，集气罐中核素的活度浓度*a*s的不确定度通过误差传递公式可得：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (1‑5) |

其中，，，和分别是*as*，*Cnet*，*Iγ*和*ε*的不确定度。

一个核素可能有几个能量峰，为了增加可信度，考虑如下筛选条件：1）只有不确定度低于12％的净峰面积才会对最终核素活度浓度产生贡献；2）某个核素的最终活度浓度是满足前述能量峰活度浓度的加权平均值，权重根据各个能量峰计算活度浓度的不确定度来确定。

一回路冷却剂氦气从一回路进入集气罐需要通过一段一回路系统管道，包括氦净化系统的部分管道和设备及气体取样管道，需要一定的时间。抽样气体装满集气罐也需要一定时间。这两部分时间定义为抽样时间*ts*。一回路核素的活度浓度可通过抽样时间和密度比修正得到：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | ( 1‑6 ) |

其中，*apc*为一回路核素的平均活度浓度，*f2*为抽样时间的修正因子，*f3*为密度差的修正因子，*ρpc*和*ρs*分别为一回路和集气罐中氦气的平均密度。一回路核素活度浓度的不确定度为。

1. 测量要求

高温气冷堆一回路惰性气体放射性核素测量，获得的信息至少包含：

（1）氦净化系统入口阀门前一回路总γ放射性活度浓度连续监测结果；

（2）氦净化系统低温吸附器后一回路总γ放射性活度浓度连续监测结果；

（3）氦净化系统入口阀门前、尘埃过滤器后和低温吸附器后一回路冷却剂氦气放射性γ谱图；

（4）一回路放射性核素类型及活度浓度，典型核素包括85mKr、87Kr、88Kr、89Kr、133Xe、133mXe、135Xe、135mXe、137Xe、138Xe和41Ar。

1. 注意事项

（1）应根据实际测量的一回路氦气放射性水平，基于GB18871的相关规定，在放化分析实验室中开展集气罐的测量实验工作；

（2）在进行一回路氦气取样及测量过程中，应充分考虑工作人员的辐射防护。

1. 质量保证和控制

高温气冷堆核动力厂一回路惰性气体放射性核素测量工作的实施单位必须经资格评审合格并持有国家核安全监管部门颁发的相应的许可证，按照HAF 003《核电厂质量保证安全规定》制定并有效实施质量保证大纲，并在满足辐射防护要求和放化分析条件要求的场所进行。

参 考 文 献

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| [1] GB 6249 | 核动力厂环境辐射防护规定 |  |
| [2] T/CNS 22 | 高温气冷堆核动力厂辐射防护设计准则 |  |
| [3] T/CNS 97 | 高温气冷堆核动力厂工艺辐射监测和放射性流出物监测系统设计准则 |  |
| [4] EJ/T 1091-1999 | 放射性核素活度测量锗γ谱仪法 |  |
| [5] | Nie R, Wang Y, Xie F, *et al.*, Experimental measurement and theoretical calculation of Ar-41 radioactivity in the primary coolant of HTR-10, *Progress in Nuclear Energy*, 184, 105686 (1-12), 2025. |  |