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

燃耗测量系统设计准则

Design criteria for burnup measurement system 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](#_Toc1926936359)

[前  言 II](#_Toc555585819)

[1 范围 3](#_Toc852050916)

[2 规范性引用文件 3](#_Toc1454072196)

[3 术语和定义 3](#_Toc1036971007)

[4 系统功能 4](#_Toc1812015917)

[4.1 主要功能 4](#_Toc1714059311)

[4.2 辅助功能 4](#_Toc2015833720)

[5 系统构成 4](#_Toc1566296287)

[5.1 燃耗测量装置 4](#_Toc1862904437)

[5.2 元件分检装置 5](#_Toc697015061)

[5.3 远程控制子系统 5](#_Toc2115760252)

[6 安全分级 5](#_Toc900617371)

[7 设计原则 5](#_Toc1105885666)

[7.1 燃耗测量装置 5](#_Toc361989428)

[7.2 元件分检装置 6](#_Toc412436692)

[7.3 远程控制子系统 6](#_Toc1380684317)

[8 设计要求 6](#_Toc2100707171)

[8.1 燃耗测量装置 6](#_Toc396787478)

[8.2 元件分检装置 7](#_Toc2054208905)

[8.3 通用要求 7](#_Toc1627422103)

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，中核战略规划总院标准化所

本标准主要起草人：张立国 肖海燕 XXXX XXXX 。

高温气冷堆核动力厂燃耗测量系统设计准则

1. 范围

本文件规定了球床高温气冷堆（以下简称：高温气冷堆）核动力厂燃耗测量系统设计准则，包括系统功能、系统组成、安全分级、设计原则和设计要求。

本文件适用于高温气冷堆核动力厂燃耗测量系统设计。

1. 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。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。

|  |  |
| --- | --- |
| GB/T 11684 | 核仪器电磁环境条件与试验方法 |
| GB/T 8993 | 核仪器环境条件与试验方法 |

1. 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

燃耗深度 burnup

比燃耗，或简称燃耗，指单位质量核燃料释放的总能量。

燃料球 fuel pebble

指高温气冷堆中使用的球形燃料元件。

石墨球 graphite pebble

指高温气冷堆中使用的球形石墨元件。

乏燃料球 spent fuel pebble

指燃耗深度大于卸料燃耗整定值的燃料球。

富集度 enrichment

指铀燃料中235U的质量分数。

能量分辨率 energy resolution

辐射谱仪能分辨的两个粒子能量之间的最小差值。能量分辨率用一个因子表示，该因子是在单能粒子分布曲线峰的半高宽（能量）除以峰位对应能量，也常用分布曲线的半高宽（能量）直接表示，本标准中采用后者。能量分辨率也常简称分辨率。

相对效率刻度 efficiency calibration

指通过技术手段确定高纯锗γ谱仪子系统探测其他能量的γ射线的探测效率相对于137Cs 661.657 keV特征射线探测效率的过程。

标准刻度 standard calibration

指通过标准刻度源确定γ能谱中137Cs 661.657keV特征峰射线净计数率与标准刻度源活度之间关系的刻度过程。

系统校检 efficiency check

指对高纯锗γ谱仪子系统的探测效率稳定性的定期核查和校正，即探测效率监督。

1. 系统功能
   1. 主要功能

燃耗测量系统要实现如下两项基本功能：

1. 鉴别石墨球和燃料球。
2. 测量燃料球燃耗深度，识别乏燃料球。
   1. 辅助功能
3. 辅助完成初装堆以及过渡过程中装载不同富集度燃料的燃料球鉴别。
4. 乏燃料球与石墨球分检鉴别。

燃耗测量系统的主要功能服务于高温气冷堆安全、经济地运行，辅助功能服务于高温气冷堆乏燃料球和石墨球的分类贮存。

1. 系统构成
   1. 总体配置与要求

燃耗测量系统通常由多套燃耗测量装置、多套元件分检装置和1套远程控制子系统构成。

燃耗测量装置的配置数量应与燃料装卸系统相适应，满足燃料循环的要求。

元件分检装置的配置数量应与乏燃料贮存系统相适应，满足乏燃料卸料的要求。

远程控制子系统一般可只配置1套。

* 1. 燃耗测量装置

燃耗测量装置的核心功能是测量燃料球的燃耗深度，识别乏燃料球。

燃耗测量装置应能够鉴别石墨球和燃料球，并在初装堆芯以及过渡过程中鉴别不同富集度的燃料球。

燃耗测量装置主要组成部分及其功能如下：

1. 高纯锗γ谱仪子系统，获取燃料球/辐射源的γ能谱数据；
2. 刻度子系统，用于对高纯锗γ谱仪子系统进行能量、相对效率和标准刻度；包括标准放射源、准直子系统；
3. 燃耗测量定位装置（通常集成在燃料装卸系统中），用于将待测对象（石墨球或者燃料球）固定在指定的位置；
4. 屏蔽，围绕在高纯锗探测器或者辐射源周围，保障高纯锗γ谱仪子系统性能，使得环境辐射水平的影响满足探测精度要求；
5. 电气单元，内部电气分配和外部电气接口；
6. 控制单元，数据分析和存储、流程控制及内外部控制和通信接口。

电气单元和控制单元可以集成于同一电气柜中。

* 1. 元件分检装置

元件分检装置核心功能为鉴别石墨球和乏燃料球。

元件分检装置主要组成部分及其功能如下：

1. 前端探测器，负责探测石墨球或者燃料球中发射的γ射线；
2. 计数率仪，对前端探测器产生的探测信号进行分析处理和记录；
3. 屏蔽，围绕在前端探测器周围，减少测量位置周围环境和燃料球发射的γ射线对测量的影响；
4. 电气单元，负责内部电气分配和外部电气接口；
5. 控制单元，负责数据分析和存储、流程控制及内外部控制和通信接口。

电气单元和控制单元可以集成于同一电气柜中。

* 1. 远程控制子系统

远程控制子系统核心功能是为燃耗测量装置和元件分检装置的远程监视和维护提供手段。

远程控制子系统主要组成部分及功能如下：

1. 远程控制终端，电子计算机系统，实现远程监视和维护功能的核心设备；
2. 网络设备，包括交换机（或者路由器）及必要的光电转换接口设备等。
3. 安全分级

燃耗测量系统各装置和子系统及其所属设备均属非安全级、常规抗震类和常规质保等级。

1. 设计原则
   1. 燃耗测量装置

燃耗测量装置通过高纯锗γ谱仪子系统获取待测对象的γ能谱，通过分析γ能谱，确定控制流程，从而实现其功能。

可通过待测对象γ射线总强度测量鉴别出石墨球和燃料球；可通过测量燃料球中的137Cs活度计算出燃耗深度，进而鉴别乏燃料球；可通过短半衰期核素的活度鉴别出装载有不同富集度燃料的燃料球。

应对测量对象进行源项分析确定其γ能谱，并对高纯锗γ谱仪探测的能谱进行预测分析，基于分析结果确定燃耗测量装置关键设计特征和设计参数。

通常应保证达到平均卸料燃耗的燃料球的燃耗测量误差不大于5%（1σ）。

应优化运行时参数，以保证燃耗测量装置日测量待测对象的数量能满足反应堆正常运行的要求。

* 1. 元件分检装置

元件分检装置通过前端探测器和计数率仪获取待测对象的γ能谱，通过总放射性水平的测量，实现石墨球和乏燃料球的鉴别测量。

应对待测对象进行源项分析，确定其γ能谱，并分析探测器上的能量沉积，进而确定元件分检装置关键设计特征和设计参数。

一般应保证乏燃料球与石墨球造成的计数率差异不小于1000倍。

应优化运行时参数，以保证元件分检装置日测量待测对象的数量能满足乏燃料卸料能力的需求。

* 1. 远程控制子系统

远程控制子系统服务于现场多台/套燃耗测量装置和元件分检装置的监督与维护，应保证各装置与远程控制终端间的网络通信的可靠性、安全性、及时性和一致性。

1. 设计要求
   1. 燃耗测量装置

高纯锗γ谱仪子系统

高纯锗探测器的相对效率不应低于30%，峰康比不低于60：1（对60Co 1332.5 keV）。

高纯锗γ谱仪应工作在高通过率模式下，且允许最大计数率不应小于100 kcps。

在燃料球造成的预期计数率范围内，高纯锗γ谱仪的能量分辨率应能够保证清晰分辨燃耗标识核素（137Cs 661.657keV）的特征峰周围的干扰核素的特征峰；通常该分辨率不应大于2.6keV。

刻度子系统

刻度子系统应为高纯锗γ谱仪子系统提供能量刻度、相对效率刻度、标准刻度和系统校检等功能。

为能量刻度、相对效率刻度和探测效率监督而引入的放射源，需保证其射线不会干扰燃耗测量装置对待测对象的测量。

准直子系统中，用于限定被测对象出射射线进入高纯锗探测器的强度的准直应至少保证燃料球含源区域均在准直锥体内，且一般应保证高纯锗γ谱仪子系统的最大计数率不超过通过率曲线峰值。

屏蔽

应在高纯锗探测器周围设置屏蔽，使得周围环境中发射的射线造成的高纯锗γ谱仪子系统的计数率不超过30cps。

应为标准放射源提供足够的屏蔽，以满足其所在区域的辐射防护要求。

控制

燃耗测量装置的测量流程应实现全自动化。

单次测量后数据分析与控制信号生成之间的时间应控制在2s以内。

卸料燃耗整定值的设定应与反应堆运行需求相配合。

其余控制过程中的关键参数推荐如下：

|  |  |
| --- | --- |
| 石墨球鉴别测量时间 | 3s |
| 高、低富集度燃料球鉴别测量时间 | 10s |
| 浅燃耗和深燃耗燃料球鉴别测量时间 | 10s |
| 乏燃料球鉴别测量时间 | 25s |

应允许根据运行经验反馈和运行需求调整上述控制参数。

应能够在装置空闲期间进行本底测量，以及时发现测量环境变化或者探测设备异常。

* 1. 元件分检装置

前端探测器和计数率仪

前端探测器可选用闪烁体探测器。

元件分检装置设计应保证前端探测器在其使用寿期内无明显性能下降，且能量注量率不超过探测器材料最大允许能量注量率。

计数率仪应工作在高计数率模式中，支持计数率范围应到约106 cps；且在其稳定工作的前提下，可不必考虑分辨率。

应为前端探测器和计数率仪构成的探测单元配置放射性源，用于监督探测单元的能谱峰位的稳定性和探测效率的稳定性，推荐Am-241放射源和天然KCl。

屏蔽

应在前端探测周围设置足够屏蔽，用于保证环境本底和探测器周围短时通过的乏燃料球造成的计数率可忽略，或者远低于乏燃料球与石墨球分检限值。

控制

燃耗测量装置的测量流程应实现全自动化。

建议对待测对象的测量时间为3s，供设备动作的信号应能够维持在4s，且信号维持过程可随时被中断。

石墨球与乏燃料球分检限值应根据对待测对象的γ射线强度的探测过程分析确定。

应允许根据运行经验反馈和运行需求调整上述控制参数。

应能够在装置空闲期间进行本底测量，以及时发现测量环境变化或者探测设备异常。

* 1. 通用要求

接口要求

土建接口

燃耗测量系统落地安装或者挂壁安装应优先考虑金属预埋件作为设备安装基础。

为保障燃耗测量装置针对燃料球测量的准直子系统的安装质量，应设置较大的预埋孔道，用以补偿土建误差及安装误差。预埋孔道应能够在准直子系统安装完毕后进行二次灌浆封闭；灌浆应填满准直子系统部件与预埋孔道间的所有空间，且保证灌浆材料密度不低于2.0 g/cm3。

机械接口

燃耗测量装置接口系统为燃料装卸系统，燃耗测量装置中准直子系统和高纯锗探测器等的安装定位应以待测对象（燃料球或者石墨球）球心位置或其替代基准为基础。通常，辐射测量过程中，待测对象停靠在燃料装卸系统燃耗测量定位分配器中。

元件分检装置前端探测器安装在乏燃料贮存系统的元件分检定位装置中，因此应协调两部件设计，保障前端探测器的可靠固定、有效屏蔽和电缆出线；应优化电缆出线孔道，使其对屏蔽的减弱作用对鉴别测量的影响可以忽略。

电气接口

对于燃耗测量装置，应配备不间断电源，以防止偶然断电导致高纯锗探测器回温问题。

用电负荷估计应考虑正常运行用电需求和部分设备投运时的短时较高负荷。

对外电气接口应尽量集中，避免每个用电部件的独立取电。

控制接口

与后续控制动作直接相关联的仪控信号，宜采用硬接线方式保障信号传递的可靠性和低延时。

测量数据、流程控制参数等宜通过通信接口传递。

时钟接口

燃耗测量系统应接入全厂时钟，以保证流程控制、数据传输与存储等的协调。

全厂时钟信号宜接入远程控制子系统，并通过燃耗测量内部网络实现系统内的时间同步。

推荐采用NTP协议实现系统内部时钟与全厂时钟的同步。

暖通

应根据关键零部件/设备运行的环境温、湿度要求，明确对暖通系统的要求。

应特别关注高纯锗探测器所在房间的温、湿度环境情况，保证高纯锗探测器表面不出现结露、凝水等现象。

电缆要求

燃耗测量系统内、外部电缆均应采用低燃无卤阻燃电缆，阻燃等级为A；当多指标要求发生冲突（如耐辐照性能电缆均无法达到A级）时，阻燃等级也不应低于C。

对应弱信号传输电缆（如高纯锗探测器输出、通讯电缆）须特别关注屏蔽接地等问题。

电气要求

燃耗测量系统设备/部件应能够耐受供电电压±10%的波动，且不影响燃耗测量系统性能。

电磁兼容要求

燃耗测量系统中燃耗测量装置和元件分检装置应按照GB/T 11684中对核电厂用仪表的电磁兼容试验要求进行电磁兼容测试，且验收准则为A类。

对燃耗测量装置，试验验收指标应包含特征γ射线全能峰（推荐137Cs 661.657keV射线）的峰位、计数率、分辨率和谱仪输出高压的稳定性。

对元件分检装置，实验验收指标应包含计数率和计数率仪高压输出稳定性。

环境适应性要求

燃耗测量系统中燃耗测量装置和元件分检装置应按照GB/T 8993中的环境条件和试验方法进行环境适应性试验。

燃耗测量装置试验环境条件推荐GB/T 8993 Ib组。

元件分检装置试验环境条件推荐GB/T 8993 1c组。

接地要求

燃耗测量系统应至少配备系统地（信号地）和保护地，分别与现场对应接地系统对接。