

核安全导则HAD 102/15-2021

# 核动力厂燃料装卸和贮存系统设计

(国家核安全局 2021 年 12 月 17 日批准发布)

国家核安全局



# 核动力厂燃料装卸和贮存系统设计

(2021年12月17日国家核安全局批准发布)

本导则自2021年12月17日起实施

本导则由国家核安全局负责解释

本导则是指导性文件。在实际工作中可以采用不同于本导则的方法和方案,但必须证明所采用的方法和方案至少具有与本导则相同的安全水平。



# 目 录

1	引言.....	1
1.1	目的.....	1
1.2	范围.....	1
2	设计目标和设计要求.....	2
2.1	安全功能.....	2
2.2	设计考虑的核动力厂状态.....	3
2.3	设计要求.....	5
3	燃料贮存系统构筑物、系统和部件的设计基准.....	8
3.1	概述.....	8
3.2	纵深防御的应用.....	9
3.3	安全功能的考虑.....	9
3.4	假设始发事件.....	9
3.5	内部危险.....	10
3.6	外部危险.....	13
3.7	设计限值.....	14
3.8	可靠性.....	16
3.9	结构完整性.....	19
3.10	安全分级.....	20
3.11	环境鉴定.....	20
3.12	防止临界.....	21
3.13	辐射防护.....	23
3.14	材料.....	24
3.15	监测.....	25
3.16	照明设备.....	27
4	燃料装卸系统设备和部件的设计基准.....	27
4.1	概述.....	27
4.2	设计要求.....	28
4.3	安全功能的考虑.....	29

4.4	假设始发事件.....	29
4.5	内部危险.....	30
4.6	外部危险.....	30
4.7	设计限值.....	31
4.8	可靠性.....	31
4.9	强度分析.....	31
4.10	其他的设计考虑.....	32
4.11	安全分级.....	35
4.12	环境鉴定.....	35
4.13	辐射防护.....	35
4.14	材料.....	36
5	已辐照燃料的检查和修复设备及燃料相关组件的装卸和贮存.....	36
5.1	用于检查、修复已辐照燃料及操作破损燃料的设备.....	36
5.2	已辐照燃料相关组件等部件的装卸和贮存系统.....	37
6	燃料容器装卸.....	39
6.1	概述.....	39
6.2	燃料容器装卸设备的设计要求.....	40
6.3	便于燃料容器装卸的设计要求.....	40
6.4	外部危险.....	41

# 1 引言

## 1.1 目的

本导则是对《核动力厂设计安全规定》（HAF102）有关条款的说明和细化，其目的是为新建核动力厂燃料装卸和贮存系统的设计提供指导。本导则的主要内容可作为在役核动力厂设计修改和安全审查的参考。

## 1.2 范围

1.2.1 本导则中的核动力厂主要是指为发电或其他供热应用（诸如集中供热或海水淡化）而设计的，采用水冷反应堆的陆上固定式核动力厂。其他类型或采用革新技术的反应堆设计可参照本导则，但应经过细致的评价和判断。

1.2.2 本导则适用于核动力厂燃料装卸和贮存系统的设计，涵盖核动力厂燃料装卸和贮存系统的以下所有阶段：

- （1）新燃料的安全接收；
- （2）新燃料在使用前的检查和贮存；
- （3）转运新燃料装入反应堆；
- （4）从反应堆中卸出已辐照燃料并运输至乏燃料池；
- （5）需要时已辐照燃料重新装入反应堆；
- （6）已辐照燃料贮存、检查、修复以及将其从乏燃料池移出所作的准备；
- （7）燃料容器在厂房内的装卸。

1.2.3 本导则对已辐照燃料相关组件等部件（如控制棒组件）的

装卸和贮存也给出了相关指导。

1.2.4 如果新燃料（包括铀钚混合氧化物燃料）包含经过后处理回收的易裂变材料，会产生辐射。虽然这样的燃料在装卸时不需要冷却，但在本导则中给出了适用的指导（如屏蔽措施）。

1.2.5 本导则不包括以下内容

（1）与燃料和燃料相关组件装入和卸出堆芯有关的各种反应堆物理问题；

（2）与反应堆装料前的准备工作（例如轻水堆压力容器顶盖和上部堆内构件的拆卸）和装料后反应堆恢复工作有关的设计内容；

（3）燃料容器、容器运输设备及容器装料辅助工具及装置的设计；

（4）乏燃料离堆贮存（例如，乏燃料干法贮存设施）；

（5）燃料实物保护或与核材料保障有关的内容；

（6）将破损燃料装入运输容器。

## 2 设计目标和设计要求

### 2.1 安全功能

对于设计中考虑的所有核动力厂状态，燃料装卸和贮存系统的构筑物、系统和部件的设计应确保执行的安全功能如下：

（1）保持燃料的次临界；

（2）排出已辐照燃料的余热；

（3）包容装卸和贮存的燃料等产生的放射性物质、屏蔽辐射和限制燃料装卸、贮存和操作事故的放射性物质释放。



## 2.2 设计考虑的核动力厂状态

### 2.2.1 核动力厂状态分类

设计中考虑的核动力厂状态包括正常运行、预计运行事件、事故工况（设计基准事故和设计扩展工况）。根据本系统的设计特点和安全功能，本导则中核动力厂状态仅涉及与燃料贮存系统相关的核动力厂状态。

### 2.2.2 正常运行

2.2.2.1 正常运行期间，应保证燃料的次临界度、乏燃料池水温度和职业照射剂量（包括工作场所的辐射水平和气载放射性活度水平）均不大于为正常运行所设定的限值和边界条件。

2.2.2.2 应设置冷却系统排出已辐照燃料余热，将乏燃料池水温度保持在正常运行所设定的最高温度以下。

2.2.2.3 在设计已辐照燃料贮存系统时，应考虑适当的措施，以满足：

（1）保持池水的放射性活度和化学成分处于正常运行所规定的范围内。如适用，还应保持池水中的可溶性中子吸收材料浓度处于正常运行的限值内；

（2）补偿池水蒸发的损失；

（3）保持池水适当的透明度，便于燃料操作；

（4）监测和控制池水温度和水位；

（5）监测和控制气载放射性活度。

2.2.2.4 支持已辐照燃料贮存系统的空调和通风系统参照相关核安全导则的要求。

### 2.2.3 预计运行事件

2.2.3.1 应确定预计运行事件及其必要的设计措施，将燃料的次临界度、池水温度和乏燃料池水装量维持在预计运行事件所规定的限值范围内。

2.2.3.2 基于发生的频率和放射性后果，可能导致预计运行事件的假设始发事件的典型案例包括但不限于：

- (1) 丧失厂外电源；
- (2) 乏燃料池水装量减少（小泄漏）；
- (3) 丧失部分正常冷却能力；
- (4) 可溶性中子吸收材料的稀释（适用于压水堆）；
- (5) 燃料组件放置异常（例如：燃料贮存格架中单个燃料组件位置错放，或单个燃料组件跌落但未造成燃料包壳破损）。

### 2.2.4 事故工况

2.2.4.1 应假设可能发生的设备故障，这些故障产生的后果会造成比预计运行事件更严重的状态（影响本导则 2.1 所述的安全功能）。

2.2.4.2 基于事故发生的频率和放射性后果，分别确定设计基准事故工况和设计扩展工况的典型案例如下：

- (1) 设计基准事故
  - 用于正常运行的乏燃料冷却功能失效；
  - 单个已辐照燃料组件跌落并造成燃料包壳破损（仅针对放射性物质释放）；
  - 燃料贮存区中子吸收或慢化条件的显著变化〔例如：在湿法贮存区可溶性中子吸收材料的大量稀释（仅适用于压水堆），或在新

燃料干法贮存区遭到水淹]；

—连接到乏燃料池的非抗震水传输管道破裂。

## (2) 设计扩展工况

—多重故障导致冷却系统长期失效；

—基于概率安全风险分析选择的故障组合（例如：预计运行事件组合，或设计用于减轻事件影响的系统发生共因故障）。

## 2.3 设计要求

### 2.3.1 保持燃料次临界

2.3.1.1 燃料装卸和贮存系统应设计成在所有核动力厂状态下保持规定的次临界裕度以防止临界。

2.3.1.2 燃料贮存系统应设计成通过燃料贮存格架适当的几何安全布置和/或固定式中子吸收材料以防止临界。

2.3.1.3 燃料贮存系统的设计应考虑使用物理或工艺措施以增加正常运行期间燃料贮存的次临界裕度，防止在假设始发事件（包括内部、外部危险产生的假设始发事件）期间达到临界。

### 2.3.2 排出已辐照燃料的余热

为了满足对已辐照燃料适当冷却的需求，设计应保证在正常运行、预计运行事件和设计基准事故工况下，乏燃料池水温度不超过规定的限值。在设计扩展工况下，应提供相应的手段防止已辐照燃料组件裸露。

### 2.3.3 包容放射性物质和限制事故的放射性物质释放

2.3.3.1 应提供设计措施，防止在操作过程中对燃料（棒和组件）造成损坏。应提供设计手段在已辐照燃料贮存时收集和过滤放射性物

质，使正常运行时放射性物质释放保持在可合理达到的尽量低的水平。

2.3.3.2 应设置通风系统以减少气载放射性物质的浓度及防止或减少对辐射危害区域的直接照射和污染。

2.3.3.3 应提供设计措施，防止已辐照燃料组件在乏燃料贮存区内裸露。

2.3.3.4 设计应保证发生单个燃料组件跌落事故时，放射性物质释放后果满足相关验收准则。

## 2.3.4 辐射屏蔽

2.3.4.1 燃料装卸设备和燃料贮存系统应提供必要的屏蔽，使运行状态下工作人员的辐射剂量不超过剂量限值，并保持在可合理达到的尽量低的水平。

2.3.4.2 应采取必要设计措施防止在事故工况下由于已辐照燃料失去屏蔽而导致工作人员受到过量的照射。

## 2.3.5 燃料贮存能力

2.3.5.1 应提供足够的已辐照燃料贮存容量，以保证足够的贮存时间，使其从乏燃料池运出之前，可进行充分的放射性衰变和余热排出。对于铀钚混合氧化物燃料，应考虑其更高的余热排出。

2.3.5.2 在确定贮存容量是否足够时，应考虑满足在反应堆寿期内任何时间可能发生的最大燃料贮存需求。另外，根据反应堆类型，应对在任何时间为卸载一个整堆芯燃料提供自由空间。

## 2.3.6 安全和安保的接口

燃料装卸和贮存系统的设计应利于安保措施的应用和保持。

## 2.3.7 经验证的工程实践

2.3.7.1 燃料装卸和贮存系统中的安全重要物项必须是此前在相当使用条件下验证过的，否则该物项必须具有高质量且其技术经过鉴定或试验。

2.3.7.2 当引入未经验证的设计或设施，或存在偏离已有工程实践的情况时，必须借助适当的支持性研究、特定验收准则的性能试验，或通过其他相关应用中获得的运行经验的检验，来证明其安全性能是合适的。新的设计、设施或实践必须在投入使用前经过充分的试验，并在使用中进行监测，以验证达到了预期效果。

### 2.3.8 安全评价

为了满足 HAF102 中关于安全评价的要求，在燃料装卸和贮存系统的设计过程中应尽早开展安全评价。随着设计和确认性分析活动之间的不断迭代，安全评价的范围和详细程度随着设计的深入不断地扩大和提高。关于确定性安全评价和概率论安全评价的建议，参考相关核安全导则。

### 2.3.9 其他考虑

2.3.9.1 除了确保燃料贮存安全外，燃料装卸和贮存系统的设计应便于实施以下活动：

- (1) 检查燃料（包括棒和组件）；
- (2) 安全重要物项的维修、定期检查、校准和试验；
- (3) 识别每个燃料组件；
- (4) 核燃料衡算和控制活动；
- (5) 去污、维修和退役。

2.3.9.2 设计上应采取措施减少正常操作过程产生放射性废物。

2.3.9.3 燃料装卸和贮存系统的构筑物、系统和部件的设计应考虑辐照影响。

### 3 燃料贮存系统构筑物、系统和部件的设计基准

#### 3.1 概述

3.1.1 本导则中，燃料贮存相关的安全重要物项包括：乏燃料池结构、乏燃料池衬里、乏燃料池冷却设施、必要的补水设施、水闸门和燃料贮存格架。

3.1.2 安全重要物项应按 HAF102 中燃料装卸和贮存系统的要求进行设计，同时应考虑安全重要物项设计基准及相关的适用要求。

3.1.3 安全重要物项的设计基准应考虑以下要素：

- (1) 执行的安全功能或对安全功能的贡献；
- (2) 必须承受的假设始发事件；
- (3) 保护物项免受内部危险和外部危险的影响；
- (4) 安全分级；
- (5) 设计限值或验收准则；
- (6) 工程设计规范；
- (7) 必要的仪表和监测；
- (8) 防止共因失效的措施；
- (9) 环境鉴定需考虑的环境条件；
- (10) 材料的选择。

3.1.4 在设计上应考虑必要的措施和装置，以便在超出设计基准事故的多重故障发生时，可采用移动设备确保燃料安全贮存，此时应

为移动设备提供所需的接口。

## 3.2 纵深防御的应用

3.2.1 乏燃料贮存系统的设计应包括多重手段，保证在设计考虑的所有核动力厂状态下排出已辐照燃料的余热和保持已辐照燃料贮存的次临界裕度。

3.2.2 应识别已辐照燃料余热排出手段潜在的共因失效并评估失效的后果。在可能导致燃料组件裸露或排出余热中断的情况下，应通过实施多样化和冗余的措施最大可能地消除已识别的缺陷。

3.2.3 各种冷却措施之间的冗余性、多样性和独立性的组合应用应证明冷却剂的温度不会超出运行状态和事故工况所规定的限值，并防止燃料组件的裸露。

## 3.3 安全功能的考虑

应详细描述燃料贮存系统所执行的安全功能，以及各主要构筑物、系统和部件在安全功能执行中所做的贡献，以确定本系统构筑物、系统和部件的设计基准。

## 3.4 假设始发事件

3.4.1 与燃料贮存系统设计有关的假设始发事件应包括可能导致安全功能降级的事件，例如次临界裕度减少、已辐照燃料余热排出能力降低、放射性物质大量释放或运行人员受到大量直接照射的事件。假设始发事件是由设备故障、操作失误、外部危险或内部危险引起。假设始发事件的典型案例参见 2.2.3.2 和 2.2.4.2。

3.4.2 乏燃料贮存区应保持适当的池水装量，以满足已辐照燃料余热的排出和屏蔽辐射的安全功能，且有助于保持燃料贮存的次临界

裕度，因此由于连接到乏燃料池的管道破裂引起的池水装量丧失应作为假设始发事件：

(1) 应有对应的设计措施防止乏燃料池水流失导致水位降低到屏蔽所需的水位之下；

(2) 应采取措施（如隔离阀、防虹吸装置），将管道破裂时乏燃料池水装量的流失减至最小；

(3) 乏燃料池应有足够的水装量确保有充足的时间实施纠正措施，以避免已辐照燃料组件裸露。

3.4.3 应根据假设始发事件设定燃料贮存系统所需承受的边界条件，以确定为减轻其后果而设计的设备所必需的性能。

### 3.5 内部危险

3.5.1 安全重要物项应设计成能抵御由内部危险引起的载荷。

3.5.2 燃料贮存系统的冗余设备应尽可能地隔离或完全隔离，并在必要时加以保护，防止系统丧失执行安全功能的能力。

3.5.3 应保证单一内部危险不会导致乏燃料贮存系统的冷却能力全部丧失。

3.5.4 应考虑由旋转机械故障、承压设备破裂或其他可能途径产生的飞射物，必要时应提供防护，以保证不存在安全上不可接受的后果。尤其需要考虑气体和常规燃料的贮存及其相关的运输安排，以防止潜在爆炸产生的飞射物。

3.5.5 所采用的设计应提供适当裕量，以防止由于内部危险引起的陡边效应。

3.5.6 应根据内部危险相关的核安全导则识别与本系统设计有关



的内部危险，并制定相应措施保护燃料贮存系统和设备免受这些内部危险的影响。

3.5.7 影响燃料装卸和贮存系统设计的内部危险典型案例包括载荷跌落、内部水淹、管道破裂、火灾和爆炸。

#### 3.5.7.1 载荷跌落<sup>1</sup>

(1) 应考虑载荷跌落的可能性。跌落事故可能会损坏已贮存燃料或影响其他安全功能的执行。燃料操作过程中的载荷跌落主要是由设备故障或操作人员失误引起的。根据载荷跌落的后果，载荷分为重载和轻载：

— 对于轻载（如燃料组件），设计应考虑该载荷在其任何操作区域内的跌落；

— 对于燃料贮存区域重载的操作，应采取设计措施避免重载的跌落。

(2) 在燃料贮存区域，应通过对装卸料、燃料贮存和容器装载区域的合理布置、以及燃料装卸设备的可靠设计避免在燃料贮存区域发生重载跌落：

— 燃料装卸和贮存系统的设计和布置应避免重载在燃料贮存区域上方经过。应通过燃料贮存区域结构独立性、设置结构围堰或其他结构等措施防止重载跌落的间接影响，以避免在重载跌落于燃料贮存邻近区域时造成乏燃料池水装量的大量丧失；或

— 起重机满足单一故障保护设计及相关吊具的保守设计，可以

---

<sup>1</sup> 本导则中的载荷是指操作的重载和轻载。重载：操作的载荷其重量大于单个带最重燃料相关组件的燃料组件加上相应操作工具的总重量。轻载：操作的载荷其重量小于或等于单个带最重燃料相关组件的燃料组件加上相应操作工具的总重量。

排除与换料操作相关的重载跌落。这类重载包括反应堆压力容器顶盖、堆内构件和燃料容器等。

### 3.5.7.2 内部水淹

新燃料干法贮存区域的设计和布置应能为防止内部水淹提供保护（例如：防水淹屏障、避免水管穿过干法贮存区域和适当的排水设施），以维持次临界裕度。为了防止安全相关设备（如乏燃料监测系统和冷却系统）无法运行或误动作，也应提供防止内部水淹的保护。

### 3.5.7.3 管道破裂

设计应考虑：

- （1）保护执行安全功能的设备，防止其受到高能管道破裂的影响；
- （2）在出现虹吸效应或任何连接的工艺管道破裂时，乏燃料池的水位不会降至低于安全淹没所贮存的已辐照燃料的水位；
- （3）应确保乏燃料池的贯穿件标高均高于乏燃料池适当的屏蔽水层高度，以避免乏燃料池水水位由于贯穿件失效降低到屏蔽所需的水位之下。

### 3.5.7.4 火灾

应考虑核动力厂防火相关核安全导则提供的建议，以降低火灾发生的概率、限制火灾蔓延、保护安全重要物项以及防止丧失安全功能。关于燃料贮存系统防火的具体建议如下：

- （1）对于已辐照燃料贮存，冷却系统的各冷却手段和冷却系统的每个冗余系列应置于独立的防火区内，或至少置于独立的防火小区内；
- （2）为避免火灾，新燃料干法贮存区应位于防火区内；

(3) 应考虑灭火剂对干法贮存新燃料次临界的影响;

(4) 应考虑灭火剂对湿法贮存的新燃料和已辐照燃料次临界的影响(如非含硼水进入含硼水中)。

### 3.5.7.5 爆炸

设计应考虑:

(1) 核动力厂内燃料贮存系统邻近区域假设爆炸产生的冲击波和飞射物的影响。

(2) 核动力厂内燃料贮存区域的氢气产生风险, 并对风险进行评估。如有氢气爆炸风险, 应有相应的设计措施防止氢气产生或限制氢气浓度(例如: 确保材料与贮存水池的水化学相容或提供通风设施)。这些设计措施应能确保即使在氢气浓度较高的区域, 也能将氢气浓度维持在低于爆炸下限的安全水平。

## 3.6 外部危险

3.6.1 参考相关核安全导则的建议识别燃料贮存系统可能遭受的外部危险, 并采取相应的防护设计。

3.6.2 针对每个外部危险或可能的危险组合, 应识别和确定在危险期间或之后需要维持其可操作性和/或完整性的构筑物、系统和部件。

3.6.3 设计应对燃料贮存系统中执行安全功能的安全重要物项进行保护, 或将其设计成能够承受外部危险的影响。

3.6.4 保护燃料贮存系统免受外部危险的影响应主要依靠厂房的适当布置和设计, 或构筑物、系统和部件设计成能承受外部危险产生的载荷和可能的危险组合的载荷。

3.6.5 燃料贮存系统的安全重要物项应按照抗震设计和鉴定相关

的核安全导则确定抗震类别。执行安全功能的构筑物、系统和部件应能够承受极限安全地震动（SL-2）载荷，并应采取措施防止地震工况下其他设备对上述安全重要物项的影响。

3.6.6 安全重要物项的抗震设计应考虑以下因素：

- （1）贮存的燃料组件可能受到损坏的后果；
- （2）厂房内放射性物质的释放；
- （3）在地震期间和地震之后需要运行或需要保持完整性的物项。

地震工况下，乏燃料贮存系统的设计应考虑由于地震晃动引起的池水装量减少的影响，以及由于潜在的固体中子吸收材料移位引起的次临界裕度减少的影响。

3.6.7 对于乏燃料贮存，在发生外部危险时，用于维持适当的池水装量和保证燃料充分冷却所必需的短期行动不能依赖于诸如电力供应和消防等厂外设施。长期行动可依赖于厂外设备或厂外设施。

3.6.8 所采用的设计方法、建造规范和标准应能提供适当裕量，防止由于外部危险引起的陡边效应。

3.6.9 当自然灾害造成的载荷超过厂址危险性评价所确定的载荷时，应确保构筑物的完整性以及系统和设备的可操作性。在燃料贮存方面，应防止临界和高辐射剂量，并保持对已辐照燃料的冷却能力。

### 3.7 设计限值

3.7.1 乏燃料贮存所需的构筑物、系统和部件的性能应满足针对不同运行状态和事故工况所确定的验收准则。

3.7.2 载荷组合产生的应力应不大于构筑物、系统和部件设计规范所规定的应力限值。

3.7.3 在所有运行状态和事故工况下，燃料贮存系统的设计应防止临界并留有适当的裕量。燃料次临界计算的有效增殖因子 ( $k_{\text{eff}}$ ) 必须包括所有相关的偏倚和不确定性，并且在 95% 概率和 95% 置信水平下满足限值要求。

3.7.3.1 对于新燃料的贮存，在正常运行工况下，最大的  $k_{\text{eff}}$  不大于 0.95。在预计运行事件和事故工况下，最大的  $k_{\text{eff}}$  小于 0.98。并且分析中须考虑最佳慢化条件。

#### 3.7.3.2 已辐照燃料的贮存

(1) 若不信任可溶硼，当装载预期最大反应性组件的乏燃料贮存格架淹没在纯水中时，在正常运行、预计运行事件和事故工况下，最大的  $k_{\text{eff}}$  不大于 0.95。

(2) 若信任可溶硼，则必须同时满足以下两项准则：

— 当装载预期最大反应性组件的乏燃料贮存格架淹没在全密度纯水中时，在正常运行、预计运行事件和事故工况下，最大的  $k_{\text{eff}}$  必须小于 1.0。

— 当装载预期最大反应性组件的乏燃料贮存格架淹没在具有最小硼浓度的全密度水中时，在正常运行、预计运行事件和事故工况下，最大的  $k_{\text{eff}}$  不大于 0.95，并在核动力厂技术规格书中规定所要求的最小硼浓度。

对于可溶硼信任的依赖应最小化。

3.7.4 对于已辐照燃料的湿法贮存，乏燃料池水冷却和净化系统应设计成：

(1) 在正常运行和预计运行事件时，乏燃料池水的水位应为燃料

操作人员提供辐射屏蔽，确保操作人员受到的辐射低于限值，并保持可合理达到的尽量低的水平；

(2) 在事故工况下，应维持适当的乏燃料池水装量以提供冷却。

3.7.5 对于已辐照燃料的湿法贮存，在正常运行时（包括换料时的高热负荷工况），乏燃料池水冷却和净化系统应保证足够的余热排出能力，以维持乏燃料池的水温在操作人员和正常净化系统可接受的水平。对于预计运行事件，应能及时恢复余热排出能力，使池水温度恢复到可接受水平。在事故工况下，应依靠固有安全特性、能动/非能动系统的运行、或二者结合来保证已辐照燃料的余热排出。设计应保证：

(1) 用于正常运行的冷却系统能维持乏燃料池水温度低于正常运行所规定的最高温度；

(2) 在系统、设备失效或丧失厂外电等引起的预计运行事件下，冷却系统能保证乏燃料池水温度不大于预计运行事件所规定的限值。

3.7.6 对于正常运行、预计运行事件和设计基准事故工况，余热排出手段的设计应考虑相应工况的最大热负荷和设计基准的热阱温度。

3.7.7 乏燃料贮存格架应设计成使每一个已辐照燃料组件通过对流保持充分的热量传递，以防止燃料组件包壳管表面发生偏离泡核沸腾。

## 3.8 可靠性

3.8.1 乏燃料贮存系统安全重要物项的设计应能够承受其设计基准中规定的所有工况，并具有适当的可靠性和有效性。

3.8.2 对于采用水池系统进行燃料贮存的反应堆，其设计必须防止在所有与乏燃料池有关的核动力厂状态下发生燃料组件裸露，实际消除导致早期放射性释放或大量放射性释放工况发生的可能性。

3.8.3 安全重要物项的可靠性应与其所执行的安全功能相符。

3.8.4 应考虑影响可靠性的各种因素，以确保排出贮存的已辐照燃料余热和维持池水装量各系统的可靠性。这些因素包括：

- (1) 各构筑物、系统和部件设计和制造的安全分级及相关的规范；
- (2) 与系统有关的设计准则（冗余数量、抗震、与恶劣环境条件有关的鉴定、供电等）；
- (3) 共因失效的缺陷和相关的设计措施（如多样性、隔离和独立性）；
- (4) 保护系统免受内部和外部危险影响的布置措施；
- (5) 监测、检查、试验和维修的设计措施。

3.8.5 应保证燃料贮存系统采用保守设计方法。对于所有确定的安全等级，应规定并采用相关的工程设计规范。包括：

- (1) 适用的规范和标准；
- (2) 经验证的工程实践；
- (3) 保守的安全裕度；
- (4) 鉴定。

3.8.6 运行状态下的可靠性

应能探测、定位并收集从乏燃料池衬里泄漏的池水。应在设计阶段考虑水池维修的可能性。

3.8.7 事故工况下的可靠性

3.8.7.1 在设计基准事故下排出已辐照燃料余热所需系统的设计应满足单一故障准则。

3.8.7.2 在设计基准事故下排出已辐照燃料余热所必需的强制冷却系统应配备应急电源。

3.8.7.3 强制冷却系统中的单一设备故障不应导致丧失全部强制冷却。

3.8.7.4 在乏燃料池水冷却丧失的工况下,用于排出已辐照燃料余热的系统应设计成能重新启动。

3.8.7.5 设计采取的布置措施应能防止所贮存的已辐照燃料组件顶部裸露,并在乏燃料池和排空的燃料装卸隔间之间的水闸门故障泄漏时,保持适当的辐射屏蔽。

3.8.7.6 应采取设计措施,以补偿蒸发和假设事故相关的潜在泄漏所造成的乏燃料池水损失。设计措施包括一个固定安装的系统 and 接口,提供紧急补水以恢复池水装量。

3.8.7.7 应采取额外的措施,采用移动设备或其他固定安装的设备,以恢复乏燃料池水装量和已辐照燃料余热排出能力。这些装置应位于能够确保操作人员可进入的区域。提供的连接装置应位于乏燃料贮存区外。典型的措施包括但不限于:

- (1) 连接到其他固定安装系统(如消防水系统等);
- (2) 在远离乏燃料池的区域安装管道和配件,以便连接乏燃料池冷却水系统或使用移动设备输送补给水;
- (3) 乏燃料池区域设有排出热量和蒸汽的手段;
- (4) 在交流电源长期断电(即全厂断电)的情况下,恢复乏燃料



池强制冷却的措施。

### 3.9 结构完整性

3.9.1 为执行安全功能而设计的构筑物和设备，应能在整个使用寿期内所有运行状态和设计基准事故下保持其完整性和可操作性。设计应考虑相关的载荷条件（如应力、温度、腐蚀环境和辐射水平），并应考虑蠕变、疲劳、热应力、腐蚀等导致材料性能随时间的变化（如混凝土收缩）和潜在的钢筋材料退化。

3.9.2 应对设计中考虑的载荷和载荷组合进行识别、证明和记录。

3.9.2.1 在设计新燃料贮存格架时应考虑的设计载荷包括：

（1）静载荷；

（2）由于燃料操作而使新燃料贮存格架受到向上的提升力（假设提升力是由于燃料组件卡住引起）；

（3）SL-2 地震载荷。

3.9.2.2 在设计乏燃料贮存格架时应考虑的设计载荷包括：

（1）第 3.9.2.1 节所列的载荷；

（2）单个燃料组件跌落的动载荷；

（3）热载荷。

3.9.2.3 在设计乏燃料贮存结构时应考虑的设计载荷包括：

（1）SL-2 地震载荷和贮存区水晃动引起的有关水动力载荷；

（2）乏燃料容器跌落所产生的动载荷；

（3）长期丧失冷却事故导致的热效应载荷；

（4）静载荷。

3.9.2.4 应按照适用的规范和标准确定各载荷的组合方法。

3.9.2.5 给定载荷条件下的许用应力应满足经证明适用的规范和标准中规定的限值。如果没有适用的规范或标准，则应提供所选许用应力的理由。

3.9.3 隔离乏燃料池与其他水池或隔间的水闸门，应在正常运行和预计运行事件时保持水密封。水闸门的设计应能够承受乏燃料池侧全高度的水压。水闸门底部标高应高出所贮存的乏燃料组件顶部。水闸门的密封材料应具有良好的抗辐照性能。密封的设计应能够承受支持系统（如压缩空气供应）的丧失。

### 3.10 安全分级

3.10.1 安全分级应考虑该物项未能执行安全功能的后果、造成的工作人员的辐射照射和放射性释放水平。

3.10.2 安全分级应保持一致性，特定核动力厂状态下执行相同功能所必需的所有系统（包括支持系统）都应属于同一安全级别，否则应提供采用不同分级的理由。

3.10.3 承压设备的设计和制造应符合与其安全等级相符的规范和标准，并应证明所选设计规范和标准的适用性。在选择适用于各部件的设计和制造规范、标准时，应适当考虑其失效所造成的两方面影响（功能无法实现和放射性释放）。

3.10.4 特定构筑物或设备的设计和制造应满足与其安全等级相符的规范和标准，并应证明所选设计规范和标准的适用性。

3.10.5 燃料贮存系统的安全分级参照相关的核安全导则。

### 3.11 环境鉴定

3.11.1 安全重要物项的构筑物、系统和部件应能承受或采取适当

的防护措施，使其在整个运行寿期内支配性环境条件下执行预期的功能。

3.11.2 在事故发生前、事故期间和事故发生后的相关环境条件和 SL-2 地震工况下，构筑物、系统和部件在核动力厂整个寿期内的老化、协同效应和裕量都应在环境鉴定中予以考虑。关于老化管理的具体建议参照相关的核安全导则。

3.11.3 环境鉴定应考虑温度、压力、湿度、辐射水平、放射性气溶胶、振动、水雾、蒸汽、水淹、电磁影响、与化学试剂的接触等因素以及这些因素的组合。

3.11.4 环境鉴定应通过试验或分析（包括工程使用经验）进行，或两者结合的方式进行。

3.11.5 应确定受各种老化机理影响设备的设计寿命、检查程序和更换周期（如适用）。在对此类设备进行鉴定时，应先对试验件进行人工老化试验以模拟其设计寿命末期的状态，再进行设计基准事故条件下的试验（仅适用于安全壳内受到设计基准事故影响的设备）。

3.11.6 鉴定的数据和结果应形成文件并作为设计文件的一部分同时保存。

## 3.12 防止临界

3.12.1 通过采用物理手段或工艺措施（应优先采用几何安全布置）并留有规定的裕量，保证即使在最佳慢化的条件下也不会临界。当不能通过控制几何安全布置来保持次临界裕度时，应采用诸如固定式中子吸收材料之类的其他方法。如果使用固定式中子吸收材料，应通过适当的设计和制造确保中子吸收材料不会在运行状态或包括在 SL-2

地震期间或地震后的事故工况下脱落或移位。

3.12.2 在设计措施中应考虑所有假设始发事件可能引起的燃料或燃料贮存格架的几何变形以防止临界。还应保证燃料正常移动操作也不会造成临界。这种操作可能使正在运输的燃料与贮存的燃料接近,或使燃料可能跌落于贮存的燃料上部或燃料旁边。

3.12.3 燃料贮存格架贮存腔的设计应防止出现导致次临界裕度减少的现象。

3.12.4 在设计燃料贮存格架时应采取措施防止将燃料组件放入不适当的位置。

3.12.5 在确定次临界度时,应使用  $k_{\text{eff}}$  或替代的无限增殖因子( $k_{\infty}$ )的保守计算值。下列建议适用于燃料贮存系统的设计:

(1) 临界安全分析应证明在所有可信工况下都能够保持适当的次临界裕度, 并应考虑所有计算程序和实验数据的不确定性;

(2) 如果单个燃料组件的富集度是变化的, 应使用精确的模型或经计算假设一个保守的燃料组件富集度;

(3) 如果各燃料组件的富集度不同, 新燃料贮存格架的设计应通常基于最高富集度的燃料组件或具有最大反应性的燃料组件;

(4) 如果燃料设计是可变的和/或与燃料有关的任何数据(如设计、几何形状和材料规格、制造公差和核数据)具有不确定性, 应在所有次临界计算中使用保守值。如有必要应进行敏感性分析;

(5) 燃料贮存格架的贮存量应假设为设计的最大容量;

(6) 应不考虑设施中吸收中子的零部件的信用, 除非它们是永远固定的, 它们吸收中子的能力能够确定并且不会因为任何假设始发事

件而劣化；

(7) 燃料贮存格架应设计成防止横向、轴向和弯曲载荷导致燃料的尺寸产生不可接受的变化。在进行临界分析时，应考虑由于假设始发事件所引起的燃料贮存格架和燃料的几何变形；

(8) 对于采用固体中子吸收材料的燃料贮存格架，应考虑燃料贮存格架使用的全寿期内固体中子吸收材料的有效性；

(9) 中子慢化应作适当保守假设；

(10) 应根据燃料贮存格架的实际设计来保守考虑中子反射的影响，考虑材料、尺寸和间距，包括燃料贮存格架之间的间距和燃料贮存格架与其附近的结构（如水池底或池壁）之间的间距；

(11) 如适用，不同贮存区域的中子解耦假设应通过适当的计算加以证实；

(12) 应对因易裂变同位素的积累或吸收中子同位素的衰变而可能增加的反应性留出裕量；

(13) 应对可燃毒物存量留出裕量，该裕量只有当国家核安全监管部 门接受了给出的论证并且该论证考虑了反应性随着燃耗可能增加才能确定；

(14) 所有已辐照燃料组件应假定具有可导致最大反应性的燃耗水平和富集度值，除非燃耗信任的假定是基于燃料贮存前所做的用于确认裂变材料含量或燃耗水平计算值的适当测量而作出的。

### 3.13 辐射防护

3.13.1 乏燃料贮存设施关于辐射防护的设计应满足HAF102和相关国家标准的要求。辐射防护的具体建议参考相关的核安全导则。

3.13.2 应提供适当的通风系统和屏蔽，以保持在运行状态下气载放射性物质浓度和工作人员的直接照射处于可合理达到的尽量低的水平。

3.13.3 应配置适当的包容和过滤系统，以尽量减少对公众和环境的辐射影响，并确保其低于运行状态和事故工况下所规定的限值。

3.13.4 对于屏蔽设计，应全面考虑可能存在的辐射源项。对于乏燃料组件辐射源，应考虑包络的边界条件，包括材料成分、组件燃耗、冷却时间、已辐照燃料的最大设计贮存量、轴向燃耗等因素的影响，并考虑表面潜在的沉积源项和结构材料活化源项。

3.13.5 贯穿屏蔽屏障的贯穿件（例如：冷却系统的贯穿件或为燃料装卸而设置的贯穿件）的设计应能避免由于直接贯穿或由于辐射漏束而产生局部高 $\gamma$ 和中子辐射场。

3.13.6 由于铀钚混合氧化物燃料具有放射性，为了限制对人员的照射，装卸这类新燃料组件时应考虑设置附加的屏蔽。

### 3.14 材料

3.14.1 结构材料和焊接方法的选择应基于适当的设计规范和标准。对可能受到强辐射场辐照的材料应考虑潜在的累积辐照影响效应。此外，还应考虑由于热效应可能导致的材料退化。

3.14.2 用于乏燃料池衬里的材料以及其他与池水接触的结构材料（如燃料贮存格架）应对池水的化学性质具有低腐蚀敏感性。

3.14.3 与燃料直接接触的材料应与燃料组件的材料相容，并应尽量减少在贮存过程中可能影响已辐照燃料完整性的化学反应和电位反应。在已辐照燃料贮存期间，与已辐照燃料直接接触的材料不应使

已辐照燃料受到污染而严重影响已辐照燃料的完整性。

3.14.4 燃料贮存系统选用的材料应便于表面去污。

3.14.5 应考虑去污材料与运行环境的兼容性。

3.14.6 燃料贮存系统所用的材料应满足第3.5.7.4节关于火灾的建议。

3.14.7 对于采用固体中子吸收材料的燃料贮存格架，应证明在燃料贮存格架的使用全寿期内：

(1) 固体中子吸收材料不会丧失其完整性和有效性；

(2) 固体中子吸收材料在化学上与燃料贮存格架其他部件(材料)具有化学相容性，并且在水中化学性能稳定。

### 3.15 监测

3.15.1 应监测运行状态和事故工况下乏燃料池的水位。测量区间应包括乏燃料开始裸露的水位到满水位，可采用连续测量或间断式测量。间断式测量应设有必要的关键水位报警装置，以便指导操作人员进行相关的补水操作。

3.15.2 应监测运行状态和相关事故工况下乏燃料池的水温。

3.15.3 应监测运行状态和相关事故工况下燃料贮存和装卸区的气载放射性活度。

3.15.4 应监测运行状态和相关事故工况下乏燃料池水的放射性活度。

3.15.5 应监测运行状态下乏燃料池水的化学参数。如适用，还应有适当的监测可溶性中子吸收材料浓度的手段。

3.15.6 用于监测参与设计基准事故处理的关键参数所必需的仪

表应是冗余的。

3.15.7 在已辐照燃料操作或贮存区域应配备适用的辐射监测设备和报警装置以保护操作人员，包括应提供适当数量的辐射监测仪表，以确保对燃料操作人员的保护。已辐照燃料操作时对任何可能产生气载放射性物质的区域应进行连续的空气监测。关于辐射防护设计的更多指导参考相关的核安全导则。

### 3.15.8 乏燃料池水净化系统的设计

#### 3.15.8.1 乏燃料池水净化系统的设计应确保：

(1) 去除活化产物、破损燃料和其他源项所产生的放射性离子和固体杂质，以确保池水本身的放射性活度浓度能维持在规定的限值范围内；

(2) 满足所规定的池水化学限值〔例如：硼浓度、氯化物含量、硫酸盐和氟化物含量（如有）、pH值和电导率〕，以维持正常运行时次临界状态和尽量减少腐蚀；

(3) 池水的清澈度维持在可接受的水平，以便监测水中的燃料操作；

(4) 净化系统的能力足以在规定的时间内净化乏燃料池的水量；

(5) 必要时，采取措施控制微生物生长。

3.15.8.2 乏燃料池水净化系统应设计成能够去除池水表面的杂质和悬浮颗粒。

3.15.8.3 对于可能增加放射性物质释放或产生悬浮颗粒的操作（例如：在装卸料期间），乏燃料池水净化系统应设计成能够就地抽取池水并送至净化系统或就地净化设备。



3.15.8.4 乏燃料池水净化系统的设计应提供措施，防止燃料贮存区出现不可接受的污染物积聚，并在出现积聚时有措施将污染降低到可接受的水平。管道的设计应尽量减少法兰和其他可能沉积放射性物质的结构（如捕集装置或环路）。

3.15.8.5 在正常运行时乏燃料池水的最高温度应不超过净化设备（如离子交换器）的最高许用温度。

### 3.16 照明设备

3.16.1 在已辐照燃料装卸和贮存区域包括乏燃料池区域，应提供必要的照明设备（即在操作区附近的水下照明灯）和更换水下照明灯的方法，以便于操作、目视检查和识别燃料组件。

3.16.2 用于水下照明的材料应与环境条件相容，尤其不应发生不可接受的腐蚀或对水造成不可接受的污染。

3.16.3 应尽可能提供抗撞击和热冲击的照明装置。

3.16.4 选择偏暖色的光源，可以最大限度地扩大光在水中的传播范围。

## 4 燃料装卸系统设备和部件的设计基准

### 4.1 概述

4.1.1 燃料装卸系统主要用于反应堆燃料的装入和卸出。轻水反应堆的燃料装卸系统的设备主要包括：

（1）装卸料机，用于在反应堆装卸新燃料组件或已辐照燃料组件，并借助燃料运输系统在反应堆和贮存位置之间运输燃料组件，或直接将燃料组件运输至贮存位置；

（2）通过燃料运输通道在反应堆水池和乏燃料池之间运输燃料

组件的燃料运输系统（适用于乏燃料池位于反应堆厂房外的典型压水堆。燃料运输系统包括燃料运输管道、水下燃料运输设备）；

（3）用于在燃料贮存区运输和定位燃料组件的燃料装卸设备（如起重机、新燃料升降机和燃料抓取机等）；

（4）各种操作工具（如控制棒驱动轴的脱扣工具、新燃料组件抓取工具、乏燃料组件抓取工具等）。

4.1.2 用于重水堆（水平通道型）的燃料装卸系统的设备主要包括：

（1）用于将新燃料运输至装卸料机的系统（新燃料输送机）；

（2）用于将新燃料装入反应堆并从反应堆卸出乏燃料的换料系统（装卸料机）；

（3）用于将从装卸料机卸出的乏燃料运输至卸料池的卸料系统（升降机）；

（4）用于在卸料池、接收池和贮存池之间运输乏燃料的燃料运输系统；

（5）用于在接收池厂房和乏燃料贮存池厂房内操作乏燃料的起重机和人桥吊；

（6）各种操作工具（如燃料棒束抓取工具等）。

## 4.2 设计要求

4.2.1 应确定燃料装卸系统每个设备和部件的设计基准。安全重要物项的设计基准需考虑的要素参见3.1.3。

4.2.2 在运行状态和事故工况下，应限制载荷以确保既不会造成燃料组件损坏或意外临界，也不会对乏燃料池结构或燃料装卸设备造

成损坏。

4.2.3 在设计燃料装卸系统设备和部件时应采取措施避免在燃料装卸和运输操作期间燃料组件跌落、卡住或堵塞。

4.2.4 在设计燃料装卸系统设备和部件时应采取措施，避免在燃料操作期间燃料操作工具的跌落。

4.2.5 燃料装卸系统设备和部件应采取设计措施，避免在燃料操作期间出现零件松动。

### 4.3 安全功能的考虑

4.3.1 燃料装卸系统的设备和部件应设计成在燃料装卸操作期间维持燃料贮存的次临界裕度、避免燃料组件损坏、防止产生高辐射场和超过规定限值的放射性释放。

4.3.2 应详细说明主要设备和部件对安全功能的贡献，以确定其设计基准。

### 4.4 假设始发事件

4.4.1 与燃料装卸系统设计相关的假设始发事件包括设备故障和操作人员失误，这些故障和操作人员失误可能导致次临界裕度的降低、放射性物质的大量释放，或使操作人员遭受大量的直接照射。在设计中应考虑这些始发事件以确定必要的预防和保护措施，确保安全功能的执行。

4.4.2 燃料装载事故可能会影响乏燃料池的次临界裕量，应将操作人员失误导致的燃料组件的错放和燃料组件的跌落作为假设始发事件。

4.4.3 应考虑燃料组件跌落造成的潜在放射性物质释放，以保护

工作人员、公众和环境。

4.4.4 在反应堆进行燃料移动操作时，应通过适当的可靠措施防止燃料错放。

4.4.5 设计应考虑燃料装卸系统受力过大或载荷跌落造成燃料组件损坏。可能造成燃料组件损坏的燃料装卸系统故障实例包括燃料组件勾挂、升降时水平运行以及带载时抓具意外释放导致燃料组件跌落。也应考虑由于超行程运行（例如：在燃料组件到位后继续下降或向上运行至硬止挡）和超速而造成燃料组件的机械损坏。

## 4.5 内部危险

应主要通过适当的厂房布置及危险源的运输路线，使燃料装卸系统的设备和部件免受内部危险的影响。

## 4.6 外部危险

4.6.1 设计燃料装卸系统设备和部件时，应识别相应的外部危险。

4.6.2 燃料装卸系统的设备和部件应设计成能够承受外部危险的影响，或采取保护措施使其免受外部危险和这些危险组合的影响。

4.6.3 应主要通过适当的厂房布置，使燃料装卸系统的设备和部件免受外部危险的影响。在发生SL-2地震的情况下，装卸料设备的设计应保持其结构完整性，并确保所操作的载荷不跌落。

4.6.4 应基于SL-2地震造成的后果、在地震期间和之后是否需要该设备的操作确定燃料装卸系统的抗震设计等级。地震后果包括对贮存的燃料组件或正在操作的燃料组件可能导致的损坏和厂房内放射性物质的释放。

## 4.7 设计限值

4.7.1 设计应确保设计载荷组合所造成的组合应力不大于燃料和燃料装卸系统的各设备和部件所确定的许用应力限值。

4.7.2 应规定燃料装卸设备的运行限值和操作条件（例如：起重能力、起升、旋转和运行速度的限值，以及装卸设备的行程极限），并提供联锁确保操作不大于运行限值和操作条件。

## 4.8 可靠性

4.8.1 应确定燃料装卸设备各物项必要的可靠性。确定可靠性时应考虑设备故障的后果。为保证设备各物项必要的可靠性，应考虑以下要素：

- （1）各设备和部件的设计和制造的安全分级和相关的工程规范；
- （2）监测、检查、试验和维修的设计手段；
- （3）用于安全执行和监测燃料装卸过程的设计指令、控制和监测装置以及识别标识的设计；
- （4）用于燃料装卸区域和控制室之间的通信装置。

4.8.2 燃料装卸设备的承载部件应采用保守设计，防止燃料组件跌落和造成燃料组件承受不可接受的载荷。

## 4.9 强度分析

4.9.1 对燃料装卸系统设备和部件应进行强度分析，以证明载荷组合应力不大于其设计限值。强度分析应考虑的典型载荷包括：

- （1）静载荷；
- （2）设备在正常操作时所产生的动载荷（例如：燃料装卸设备加速度载荷）；

(3) 设备在异常操作时所产生的动载荷(例如:燃料组件跌落);

(4) SL-2 地震载荷;

(5) 温度载荷。

4.9.2 应根据适用的设计规范和标准制定载荷组合的评定方法。

4.9.3 强度分析可考虑任何用于限制载荷的设备(例如:阻尼器或减震器),还应考虑该设备的故障模式。

#### 4.10 其他的设计考虑

##### 4.10.1 通用设计考虑

4.10.1.1 当燃料装卸系统在正常操作模式发生故障时,设计上应允许使用手动操作装置将燃料组件放置于安全位置。

4.10.1.2 装卸料设备应设计成防止润滑油和其他可能降低池水纯度的物质泄漏。应防止此类物质泄漏进入湿法贮存系统,避免其对燃料、设备和贮存结构造成不利影响。

##### 4.10.2 轻水反应堆

4.10.2.1 操作燃料组件的提升机构应设计成通过物理限制或自动保护动作(被动或由控制系统触发)确保即使在装卸异常时也不会导致燃料组件承受不可接受的载荷。采用的设计方法包括:

(1) 限制提升机构电动机功率;

(2) 对提升机构电动机或操作载荷进行自动连续监测和记录;

(3) 规定速度限值。

4.10.2.2 燃料装卸设备应设计成防止燃料组件或燃料相关组件误放至已占用的位置或不适当的位置。

4.10.2.3 燃料装卸设备的设计应包括用于控制和监测燃料操作过

程的电气控制系统。电气控制系统应能防止燃料组件的不正确移动和将燃料组件放置于不正确的位置，该系统的可靠性应与燃料装卸操作的安全重要性相匹配，应考虑电气控制系统故障的后果。

4.10.2.4 在燃料组件倾翻和水平运输时，应设置支撑来限制燃料组件结构载荷的增加，确保燃料组件不会损坏。

4.10.2.5 应在燃料装卸设备的设计中采取措施，减少在反应堆装卸料操作期间燃料组件错误定位的风险。

4.10.2.6 应提供保护装置以确保燃料装卸设备在就位燃料或燃料相关组件时的升降过程中，不能进行水平移动。

#### 4.10.2.7 装卸料机的具体设计

(1) 装卸料机抓具应设计成能安全抓取，并能安全运输燃料组件，因此，抓具应具备以下安全特性和安全系统：

— 抓具应设置机械自锁，防止燃料组件意外脱钩。当装卸料机带载时，抓具在任何工况下（例如误操作或故障）都不会与燃料组件脱开；

— 抓具应设置电气联锁，以便在开始提升前已获得抓具位于正确抓取燃料组件位置的指示；

— 应设置电气联锁，确保抓具无论是带载还是空载，都只能在规定的标高才能使抓爪动作，以释放或抓取燃料组件；

— 在断电时，抓具应保持锁紧状态。

(2) 应提供保护装置（电气和/或机械联锁），辅以管理措施（例如：实时显示的载荷超载保护、超速保护、运行区域保护等）来限制装卸料机移动，避免燃料损坏。

#### 4.10.2.8 燃料运输系统的具体设计

燃料运输系统应设计成：

- (1) 即使在燃料运输过程中发生故障也能保证燃料的充分冷却；
- (2) 当乏燃料池位于安全壳外时，应采取设计措施以满足安全壳的隔离要求；
- (3) 应允许在设备失效或故障导致燃料组件卡阻的情况下，能及时将燃料组件安全撤回燃料厂房。

#### 4.10.3 重水堆装卸料机的具体设计

4.10.3.1 当乏燃料卡阻于装卸料机机头内并在实施解决措施之前滞留较长时间的情况下，应有设计措施为燃料提供持续的冷却。这些设计措施应能避免乏燃料棒束的明显损坏或燃料棒因冷却不足而破损。

4.10.3.2 在不停堆换料的核动力厂中，装卸料机和接口设备的设计应保护反应堆冷却剂回路的完整性和功能，特别是保持反应堆压力边界完整和燃料冷却功能。

4.10.3.3 为了保证换料操作过程中反应堆压力边界的完整性，在反应堆压力边界密封装置取下前和安装后都应具备验证系统密封性的手段。

4.10.3.4 应假设可能导致装卸料机在换料时卡死的工况或故障，并应采取措施防止该事故或减轻事故的后果。应采取适当的措施，将装卸料机从其卡住的位置手动释放。对于装卸料机带载燃料时的设计，应考虑装卸料机可能卡在燃料通道上造成局部流道堵塞的情况。

4.10.3.5 装卸料机的设计应防止施加于新燃料、堆芯内燃料、乏



燃料和接口设备的机械载荷超过其设计限值。

4.10.3.6 装卸料机应设计成能承受操作状态下接口系统产生的载荷。

4.10.3.7 装卸料机应设计成尽量减少因装卸破损燃料而对装卸料机造成的污染，并应便于事故后的去污。

## 4.11 安全分级

4.11.1 燃料装卸设备和部件应基于其功能和安全重要性进行安全分级。

4.11.2 燃料装卸设备的安全分级可以直接根据装卸过程中设备故障引起后果的严重程度（如燃料损坏、辐射照射或放射性物质释放）确定。

4.11.3 设备的设计和制造应满足与其安全等级对应的规范和标准要求。应选择合理的设计规范和标准。

## 4.12 环境鉴定

燃料装卸系统的环境鉴定应考虑执行安全功能的支配性环境条件，具体可参见本导则3.11。

## 4.13 辐射防护

4.13.1 用于在水下操作已辐照燃料组件的提升设备应设计成使提升行程控制在高度限值范围内，以保持必要的屏蔽水层厚度。

4.13.2 在水下使用的中空操作工具应设计成在水下时能充满水以保持水屏蔽，在提出水面时能排出水。

4.13.3 由于含有经后处理回收的易裂变物质的新燃料（包括混合氧化物燃料）具有放射性，为了限制对人员的照射，装卸这类新燃料

组件时应考虑设置附加的屏蔽。

#### 4.14 材料

4.14.1 结构材料的选择应以广泛采用的设计规范和标准为基础。应考虑材料可能长时间处于高辐照水平下累积的潜在辐照效应。

4.14.2 与燃料组件直接接触的结构和部件材料应与燃料组件材料相容，并应尽量减少在操作过程中可能导致影响乏燃料完整性的化学反应和电位反应。

4.14.3 燃料装卸设备和部件使用的材料应便于表面去污。

### 5 已辐照燃料的检查和修复设备及燃料相关组件的装卸和贮存

#### 5.1 用于检查、修复已辐照燃料及操作破损燃料的设备

5.1.1 应考虑第4章中的要求并根据设备失效后果，对用于检查和修复（拆卸和重组）已辐照燃料及破损燃料的操作设备采取安全措施。

##### 5.1.2 用于检查的设备

5.1.2.1 应提供用于目视或其他方法检查已辐照燃料组件和燃料相关组件的设备。

5.1.2.2 用于检查的设备应考虑辐照的影响，并防止燃料过热。

##### 5.1.3 修复设备

5.1.3.1 如果为了保留可重复使用的部件（如燃料盒）而需要拆卸燃料，或在贮存之前需要拆卸燃料，则应提供适当的拆卸设备。

5.1.3.2 应考虑辐照对修复设备的影响，并防止燃料过热。

5.1.3.3 修复设备应能保证燃料棒的完整性。设计应防止由以下原因产生的载荷引起燃料损坏：已拆卸燃料组件或燃料棒的吊装、倾翻

等其他装卸操作、或燃料包壳的变形。

5.1.3.4 修复设备的设计应提供可靠措施排出已辐照燃料的余热和清洁已辐照燃料设备过程中产生的热量。

#### 5.1.4 破损组件操作设备

5.1.4.1 破损燃料组件的检测设备应能在不进一步损坏燃料组件结构完整性的前提下开展检测。

5.1.4.2 应能安全贮存疑似损坏或已损坏的燃料元件或燃料组件。破损燃料组件贮存时应在装卸和贮存过程中将易裂变材料的扩散风险减到最小。

5.1.4.3 设计应考虑卸出破损燃料组件所采取的操作程序。用于操作破损燃料专用工具的设计应考虑保持适当的次临界裕度、余热排出和辐射屏蔽等方面的要求。应制定允许使用专用工具的程序，并进行严格的管理控制。

## 5.2 已辐照燃料相关组件等部件的装卸和贮存系统

### 5.2.1 概述

5.2.1.1 已辐照燃料相关组件包括已辐照控制棒组件、中子源组件、可燃毒物组件和阻流塞组件。已辐照燃料相关组件通常贮存于燃料组件中，但有时也会单独贮存于乏燃料贮存设施中。通常采用与已辐照燃料相同的装卸系统进行操作。其他需要采用与已辐照燃料相同的装卸系统进行操作的部件有堆内仪表、反应堆压力容器材料辐照样品等。

5.2.1.2 通常应遵守第3章和第4章关于燃料贮存和装卸系统的要求。5.2.2-5.2.4提供了不同类型已辐照燃料相关组件等部件的具体考虑。

### 5.2.2 已辐照燃料相关组件的通用要求

5.2.2.1 对于已辐照燃料相关组件等部件，应特别注意以下事项：

- (1) 对已辐照燃料相关组件等部件提供适当的屏蔽；
- (2) 在需要检查已辐照燃料相关组件等部件时，提供适当的联锁和其他保护措施，以保证为操作人员提供辐射防护；
- (3) 必要时，提供将已辐照燃料相关组件等部件装入适当运输容器的措施；
- (4) 必要时，提供专门的贮存、装卸和检查系统；
- (5) 装卸已辐照燃料相关组件等部件过程中，适当考虑保护贮存的燃料和限制可能产生的污染扩散；
- (6) 已辐照燃料相关组件等部件不应贮存于新燃料的贮存区。如有必要贮存这些部件，应采取措施将其临时贮存于已辐照燃料的贮存设施内。

5.2.2.2 应考虑卸出已辐照燃料相关组件等部件的操作程序。应设计操作已辐照燃料相关组件等部件的专用工具，并考虑保持足够的次临界裕度、余热排出和辐射屏蔽等方面的要求。应制定允许使用专用工具的程序，并进行严格的管理控制。

### 5.2.3 中子源

5.2.3.1 应提供适当的屏蔽和监测设备，以保护操作人员免受中子源的辐射照射。在接收装有中子源的运输容器后，应进行表面污染检查。中子源的运输容器应按要求设置清晰的标识。

5.2.3.2 在对具有放射性中子源进行装卸的过程中应监测 $\gamma$ 和中子剂量率。

5.2.3.3 所有中子源应有清晰的标识，并且这些源的管理控制措施

应到位。

#### 5.2.4 可复用部件

5.2.4.1 在绝大多数类型的反应堆中，某些燃料相关组件和燃料组件可复用（例如，压水堆的阻流塞）。这些零部件可能具有很高的活度。如果这些零部件运输到组件组装区，应尽量减少污染的扩散和对人员的照射。

5.2.4.2 应能够对可复用部件进行必要的检查，以保证尺寸的稳定性和没有任何由操作或装卸造成的可能损坏。如果可复用部件包含有可更换零件（如密封件），应能够对该可更换零件进行检查。

5.2.4.3 已辐照燃料装卸和贮存系统的设计应能够防止可复用部件被某些材料沾污，这些材料在可复用部件重新插回之后可能影响反应堆部件的完整性。

## 6 燃料容器装卸

### 6.1 概述

燃料容器的装卸设备应设计成与燃料装卸设备相容。燃料容器装卸设备、容器运输设备和相关辅助设备通常包括下列设备：

- （1）燃料容器的运输车辆；
- （2）操作燃料容器、容器顶盖和密封容器（如适用）的起重机和相关吊具；
- （3）去污设备；
- （4）辐射监测设备；
- （5）乏燃料运输容器排水、冲洗、换气和真空干燥系统；
- （6）启闭乏燃料运输容器盖的工具；

- (7) 乏燃料运输容器密封泄漏测试设备;
- (8) 防止燃料容器外表面放射性沾污的措施和装置;
- (9) 照明设备。

## 6.2 燃料容器装卸设备的设计要求

6.2.1 燃料容器装卸设备的设计应执行4.11-4.14中关于安全分级、环境鉴定、辐射防护和材料的适用要求。

6.2.2 燃料容器装卸设备应设计成能防止其跌落。通过采用满足单一故障保护设计的起重机，保守设计的相关吊具，按规程对起重机及其相关吊具进行检查、试验和维修，以及对操作人员进行充分的培训等措施，可防止重载跌落事故。

6.2.3 如果装卸设备单个部件故障可能导致不可接受的重载跌落时，可采用减震器等阻尼装置以及限制提升高度来减轻潜在的重载跌落后果。

6.2.4 应适当限制起重机的水平和垂直运行速度，以确保燃料容器的安全吊运。

6.2.5 起重机应配备可靠的制动系统以确保其不会意外移动。

6.2.6 在运输和装卸操作过程中，以及在SL-2地震期间和地震之后，燃料容器装卸设备应能防止重载跌落。

## 6.3 便于燃料容器装卸的设计要求

6.3.1 燃料容器操作区应便于燃料容器的操作。

6.3.2 乏燃料容器操作区的设计应包括容器去污系统，用于将乏燃料运输容器运输至乏燃料操作区或运出操作区之前对容器进行去污。应对乏燃料运输容器进行密封泄漏试验、表面去污试验和其他必

要的试验。针对去污产生的废液或容器冷却系统（如适用）冲洗下来的液体，应有排放到放射性废物系统的措施。

6.3.3 在燃料贮存厂房内燃料容器的运输路线应按规定的的安全吊装路径进行，防止燃料容器经过所贮存燃料组件的上方。应采取措施保护贮存的燃料组件、乏燃料池衬里和冷却系统免受燃料容器跌落或倾翻的影响。

6.3.4 用于运输燃料容器的车辆应限制容器跌落或非预期倾斜的可能性。燃料容器的运输车辆应配备可靠栓系以确保容器不会意外移动。

6.3.5 乏燃料容器装卸区域应布置成有足够的空间用于对燃料容器进行检查、放射性监测和去污活动。应为乏燃料容器和相关设备如减震器提供必要的存放空间。

6.3.6 应采取管理措施，确保冷却时间不足的燃料或未经许可的燃料不会装入乏燃料运输容器中。

6.3.7 乏燃料运输的要求参见《放射性物品安全运输规程》（GB 11806）。

6.3.8 如果燃料从乏燃料干法贮存区运回乏燃料池中，应对乏燃料容器和燃料提供冷却和辐射屏蔽。

## 6.4 外部危险

6.4.1 主要应通过厂房的适当设计，保护燃料容器装卸设备不受外部危险的影响。

6.4.2 应根据燃料容器内部燃料组件可能受到损坏的后果，以及在SL-2地震期间和地震后装卸设备的运行需要，确定燃料容器装卸设备的抗震设计要求。