

# 核电站辐射防护的设计方面

在运行、维护和退役期间将风险降至最低并为员工提供防护



创享价值  
激发信任

白皮书

## 摘要

本白皮书基于TÜV南德意志集团深入了解核电站的整个生命周期，对反应堆的设计特征进行了回顾，重点是避免任何不必要的辐射暴露。

# 目录

放射性的挑战	3
辐射防护	4
TÜV南德的操作经验	4
合理的工程实践	5
易于接近、维护和修理部件	8
为什么选择TÜV南德意志集团？	10
结论	10

## TÜV南德意志集团专家介绍



**Joachim Kröger**

**TÜV南德意志集团巴登-符腾堡州能源技术公司报价管理部门负责人**

作为一名工程师和顾问，Joachim在核系统工程、调试、开发和工程管理方面具有多年的经验。

在他的工作生涯中，参与了全球范围内的多个升级和现代化项目以及核能新建项目，并担任了核电新建电站（核岛(NI)、常规岛(CI)）报价准备的首席工程师和工程经理。Joachim目前任职核能项目的项目经理，同时也是TÜV南德意志集团巴登-符腾堡州能源技术公司报价管理部门负责人。



**Dr. Jeanne Bargsten**

**TÜV南德认证检测（中国）有限公司核电业务拓展经理**

Jeanne参与了各类国际项目，为核项目整个生命周期的各个阶段提供咨询和评估服务，包括建设、运行和退役。

她是一位拥有超过10年业内经验的资深顾问，在2022年1月被任命为TÜV南德意志集团中国核电业务拓展经理。

# 放射性的挑战



国际原子能机构（IAEA）指出<sup>1</sup>，“安全、可靠和经济的核电站通常会采取谨慎、保守的操作，以及严格的、计划周密的维护工作，从而尽量减少对工人、公众和环境的风险等。维护包括预防和纠正措施，以确保结构、系统和部件能够发挥其设计的功能。典型的维护工作包括彻底检修、修理和更换系统部件，并可能通过测试、校准和在役检查来加强”。

为了安全地达到IAEA标准规定的要求，对核电站工人的放射性防护至关重要。经合组织核能署（NEA）关于工作管理的报告<sup>2</sup>就如何优化职业性放射性防护提供了指导，明确指出需要继续努力以确保保持良好的绩效。报告中的主要领域包括“工具和设备”、“远程监测系统”和“确保不断改进”的详细章节。在本白皮书中简要地介绍了这些内容。

# 辐射防护

有效的核电站设计和建造服务确保满足所有安全和安保要求，增强公众对核电站安全的信任。也可以在早期发现错误或弱点，从而能够及时进行修改、改进和控制，以提高安全性和可用性。

为实现这一目标，所有核电站都应设计成：

- 在合理可行的情况下，尽量降低设备内外的辐射水平。
- 尽量减少排放，确保其在规定的限度内，甚至低于规定的限度。
- 尽量减少所有一次及二次废物。

有效的核电站设计和施工服务确保满足所有安全和安保要求。



## TÜV南德的操作经验

TÜV南德意志集团在核领域的全球认可度已超过60年，我们注意到核电站行业在电厂设计、调试、运行和退役过程中，往往难以完全理解辐射防护这一主题。以下信息概述了我们在反应堆设计特点、实践或缓解措施方面的操作经验，这些经验被证明有助于从辐射防护的角度进行操作和维护，以及退役工作。

TÜV南德意志集团对核电站、研究反应堆和核设施设计的支持，通常会考虑到各个不同的方面，以尽量减少对工人和公众的辐射剂量。

本白皮书总的主题侧重于关于降低工人辐射剂量率的最重要的几点：

- 总体合理的工程实践。
- 优化布局：空间分离/易于接近/便于维护和修理部件。

# 合理的工程实践

OPEX已经证明了各种设计特征在降低对工人的辐射剂量率方面的作用。另见参考1和参考2。

## 1.1 含放射性的系统和部件的设计

用于设计带放射性物质的系统部件的材料须尽可能少地使用合金成分，以减少辐照激活的可能性，以及由于腐蚀等化学原因而释放的放射性离子。这对于含钴部件尤为重要，以确保初级回路内的镀层和反应堆堆芯的中子场尽可能低。因此，含钴材料应限制在需要高耐磨性的地方使用，同时应完全避免使用含铈材料。

在选择含放射性物质系统中的部件材料时，应考虑下列标准：

- 优化材料的组合，避免腐蚀。
- 表面粗糙度应较低。
- 所有材料都应具有抗辐射性。

此外，所有物料应易于去污，例如使用专门的去污涂料。

## 1.2 水化学相关设计特征

通过诸如清洗反应堆冷却剂系统等措施，以及在热调试阶段使用保护涂层表面层等措施，最大限度地减少了主要含冷却剂系统中积聚的放射性。还应选择适当的水化学方法（例如掺入锌），并在运行期间密切观察反应堆冷却剂中重要化学参数的变化。

## 1.3 防止沉积物的设计

带放射性物质的系统中的部件在设计 and 建造时，应尽量减少沉积的可能性。具体做法包括避免固体颗粒可能沉积的边缘、间隙和阻流区。此外，还包括使用高流速，以减少进一步沉积的可能性。输送高固体含量的放射性介质的管道，在铺设时应有一定的管道倾斜角度（比如1%）。装有这种介质的容器应直立布置，其底部或设计成斜面（锥形底部），或配备特殊措施（旋翻、搅拌和除污措施）

## 1.4 便于清洁的设计

反应堆辅助设备和辅助系统的部件和管道应考虑可冲洗或去污的清洁设计，并避免出现热点。这包括提供阀门和配件，以提供足够多的冲洗连接。通风管道还应设有清洁口。

设计中还应包括便于去污和处置污水的功能，以减少工人的辐射剂量（比如为清洗可拆卸组件提供去污设施）。部件和建筑设备的自由面应设计成易于去污，并针对不同的去污程序做出规定。

用于设计带放射性物质的系统部件的材料必须包含尽可能少的合金成分，以减少因辐照而被激活的可能性，以及因腐蚀等原因而引起的放射性离子释放。



部件和管道的布置应确保操作和维护工作的便利性。还必须确保留有足够的空间，以便能够无阻碍地进行所有必要活动。



### 1.5 防止泄漏的设计

带放射性物质的系统的良好设计和建造可以防止可能导致放射性物质释放的泄漏。这包括具有多级密封泵的设计和使用密封水系统或罐装电机泵。应该注意的是，泄漏的轴封水的排除必须是可控的。可以的话，针对有可能发生放射性气体、蒸汽或水泄漏的阀门和配件，应尽可能建造成波纹管阀门或薄膜阀门。或者，可以使用一个有上密封的安全填料箱。

### 1.6 泄漏监测

如有必要，应安装泄漏监测设备。

### 1.7 取样

采样箱的布置方式应确保不超过根据安装位置机房分类的剂量率。

### 1.8 测量设备

这些装置必须是低维护和非常可靠，以避免其因辐射引起的故障和更换需要，否则会导致人员不必要的辐射暴露。

传感器/测量仪器、换能器、子配电板和装配现场的设计，应确保便于维护。

### 1.9 部件和管道的规划

部件和管道的布置应确保操作和维护工作的便利性。还必须确保留有足够的空间，以便能够无阻碍地进行所有必要活动。设计还应该包括足够的空间，以包括额外的、可移动的屏蔽装置，这在一定程度上有助于进一步降低工人的剂量率。

### 1.10 电缆线路的规划

电缆通道及其入口应与放射性部件分开。

### 1.11 机房的排水

所有可能会积水的控制室都必须有排水设计。容器出口应仅通过手动开关连接到建筑排水系统，以避免污水容器溢出时不受控制地排放。同时，必须对容器中的水位进行监测。如果可能，不同气压水平的机房应通过不同的管道进行排水，并包括可补充的水阱，以避免不同机房的大气直接接触。如果可能的话，不同气压水平的机房应该由不同的管道排出，并配备可再充水收集器，以避免不同机房的空气直接接触。

### 1.12 可去污的涂层

控制区内的混凝土结构和铁素体钢结构应涂上适当的涂料，以确保表面易于去污。

### 1.13 电气安装

电气安装完成后，部件或部件应可以从外部进行去污。原则上，只能使用IP54防护等级的防水部件和装置。

### 1.14 通信工具

所有的通信工具都应设在剂量率低的地方，并易于接近操作。

### 1.15 供应连接

为了维护和修理的需要，在控制区的设计中应包括以下供应连接：

- 深度脱盐水
- 压缩空气
- 便携式放射性测量装置用甲烷气体。

连接的位置也必须确保可以从提供的机房或部件中触手可及。

### 1.16 卫生区

任何卫生区（如淋浴间和更衣室）都必须屏蔽控制区的辐射源。这将

确保卫生区受控部分内的局部辐射剂量率不超过 $5\ \mu\text{Sv/h}$ 。控制区以外的卫生区的其他部分应设计为操作监测区。

### 1.17 乏燃料和燃料桶/池

乏燃料池的设计应确保在处理过程中，辐照燃料元件顶部至少留有3.2米的水。

### 1.18 系统排气

如果含有放射性的部件，在正常运行期间无法排除污染空气的释放，则必须一直与环境空气分离的排气系统（气体废物处理系统）连接。应对以下部件执行此操作：

- 含放射性介质的打开的燃料桶。
- 具有放射性液体水平变化的部件，如果它们未连接到气体废物处理系统。
- 进行放射性介质充装过程的电厂部分（例如取样箱和装桶）。
- 仅用于检查或维修后重新充装的排气位置，应配备移动连接装置。

此外，通风和排水管道应尽可能短些。

### 1.19 气体废物处理系统

气体废物处理系统应用于下列工作：

- 收集和保留脱气器和容器中的气体，避免释放到环境空气中。
- 减少废气的放射性，并将排放气体释放到废气中。

氙（Xe）延迟线的延迟时间是40天，而氪（Kr）是2.4天。

### 1.20 去污设施

应配备若干去污设施：

- 热车间（放射性车间）旁边拆除的部件的去污设施。
- 安全壳内部拆除部件的去污设施。
- 容器、热交换器和设备的去污设施。
- 卫生区内小部件的去污设施。



# 易于接近、维护和修理部件

## 2.1 操作便捷

关于辐射防护，所有操作和人工作业都应只在低剂量率的区域进行。

## 2.2 可维修性

在辐射防护方面，维修应尽可能地保持较低频率和较小范围。建议在部件的设计阶段也要考虑到这一点。

## 2.3 永久装置的保护

以下区域应采用永久性装置进行保护（如远程控制装置、额外永久屏蔽装置等）：

- 连接通道和走廊
- 楼梯和电梯
- 门锁和舱口
- 服务通道和机房
- 控制站
- 实验室
- 热车间（放射性车间）
- 去污室
- 热洗衣房（放射性洗衣房）
- 带放射性物质的系统的采样点

## 2.4 额外的屏蔽装置

必要时应使用额外的移动屏蔽装置。

## 2.5 部件的空间分割

控制区内的部件应能进行检查、维护、修理，必要时更换，同时符合辐射防护要求。因此，放射性部件必须与非放射性部件分开布置，如果可以的话，各个部件也都分开。此种布置也可用于起到自我屏蔽的作用，从而进一步减少工人的辐射剂量。

## 2.6 接近控制区内的机房

经常用于操作、检查或维护的房间应设计成在每一层都能方便地进入，最好能将各部件布置在同一楼层，以避免楼梯上下。

## 2.7 辅助设备和远程控制装置

为了减少人员在反复检查、维护和修理过程中的辐射，应尽可能在设计中使用适当的辅助、远程控制装置和遥视设备。

## 2.8 起重设备

尽可能使用起重设备，以减少工作时间，从而减少人员的辐射暴露。

## 2.9 定期检测

必须采取一系列措施，以减少重复检查期间的辐射暴露。这包括减少必须检查的焊缝数量，如果不能合理地避免焊缝，那么在设计时应考虑到从外部进行检查的情况。

当考虑到带有内镀层的压力容器时，应遵守以下原则：

- 容器必须易于接近操作。
- 如果底部有沉积物可能会导致较高的剂量率，则应在容器上方安装人孔。
- 应安装便于快速启闭且尽可能便捷的操作装置。
- 对于大型容器，应启用检查设备。
- 能够实现容器的完全清空。

## 2.10 维修

对于核电站的建造，应使用合适的材料和合格的设计，尽可能减少不

必要的维修。同样重要的是，要确保在不拆除其他大型部件的情况下，对于使用寿命小于工厂使用寿命的部件进行更换。虽然有些施工作业也有必要，但还应尽量减少，以减少更换时间。对于热交换器管的清洁、关闭和抽出，也应有一定的必要空间。

## 2.11 绝缘设计，减少工人辐射剂量

需要反复进行机械化超声检查的部件的绝缘层应设计成容易拆卸，并在所有焊缝区域重新安装。这减少了工作时间和工人辐射剂量率，因为能够快速处理焊缝可最大程度地减少了准备时间。

## 2.12 专用工具

在许多操作和工作中，可通过安装专门的专业设备降低工人的辐射剂量，例如：

- 过滤器更换（如使用过滤器更换机）。
- 燃料桶运输（如使用远程控制起重装置）。
- 反应堆压力容器的启闭（如使用螺栓张紧装置）。
- 燃料部件更换（如使用换料机）。
- 燃料部件检查（如通过远程控制啜吸站）。
- 废物处理（如通过远程控制对活性废物浓缩物进行装桶）。
- 实验室设备（如使用通风橱）。

### 2.12.1 螺栓张紧器

此外，应使用专业工具，如螺柱张紧器，以提高各类工作的效率并使工人辐射剂量率最小化。例如，在一些先进的核电站，会用多螺栓张紧器（MST）启闭反应堆压力容器（RPV）。这使得RPV封头的螺母可以完全远程打开。新一代MST还可以在发电站每年大修期间减少RPV启闭所需的时间。

好的副作用是，高辐射强度区域的操作人员的暴露时间，以及由此产生的辐射剂量，都被降到最低。德国几乎所有的核电站都配备了这种

张紧器（自动螺栓夹紧装置）来引导RPV的启闭，从而使此类工作的辐射总剂量变得很小。

### 2.12.2 过滤器更换机

当处理含有放射性水的系统的滤芯时，应使用可完全远程操作和屏蔽的过滤器更换机，从而保护工作人员。

### 2.13 工作平台

除现有的操作平台外，还应保持工作平台可用于特定的定期检查，并应考虑若干标准：

- 在辐射高剂量率的地方，应始终安装永久性的工作平台，从而使人员在组装和拆除时免于受到额外的辐射。
- 永久安装的工作平台不得妨碍其他操作。如果无法保证这点，则应提供可移动的平台或可快速组装和拆除的装置。
- 在规划永久性安装和可移动平台时，应考虑到后期的维护和修理工作。

### 2.14 用于放置和屏蔽已拆除部件的机房

在控制区，应提供临时放置和屏蔽放射性的组装部件，直至重新安装。确保部件不妨碍任何交通或逃生路线也很重要。

# 结论

核电站设计的精确和有效规划，可确保满足所有安全性要求，增加公众对其安全的信任，并最大程度上减少工人的辐射暴露。至关重要的是，任何错误或弱点都能在早期阶段发现，从而能够及时修正、改进和控制。

本白皮书中的信息对反应堆的设计特征进行了回顾，从辐射防护的角度来看，这些反应堆的维护或操作的运行经验已经证明是可行的。因此，很显然，核电站的设计应确保所有必要的工作都能在相对较低的辐射下进行。

## 为什么选择TÜV 南德意志集团？

TÜV南德意志集团在核领域的知名度享誉全球，60多年来一直提供卓越的品质、深入的洞察力和行业标准的实施。我们的专家参与了制定国家和国际标准。

作为全球领先的认证服务提供商，TÜV南德意志集团是质量管理和核安全方面的专家，是安全机

构、运营商、制造商和供应商值得信赖的合作伙伴。我们的专家深谙核电站的业务和监管需求，以及核相关部件和设备的新老制造商在整个核供应链中面临的挑战。TÜV南德意志集团凭借始终如一地为客户提供质量、安全和公正的服务，已被证明是全球核供应商的可靠合作伙伴。

## 参考

[1] 国际原子能机构（IAEA）——核电站的运营和维护，  
<https://www.iaea.org/topics/operation-and-maintenance>

[2] 经合组织核能署（NEA）——优化核电站职业性辐射防护的工作管理  
<https://www.oecd-nea.org/>

## 版权通知

本文所含信息仅代表TÜV南德意志集团在出版前有关讨论问题的当前观点。由于TÜV南德意志集团必须应对不断变化的市场环境，因此，不应将其解释为TÜV南德意志集团方面的承诺，并且TÜV南德意志集团不保证出版日期后任何信息的准确性。本白皮书仅供参考。TÜV南德意志集团针对本文当中所含信息不作任何保证、明示、暗示或其他形式保证。用户应负责遵守全部适用版权法。获得TÜV南德意志集团书面许可前，在不限制版权的前提下，不得复制、储存或将本文任何部分纳入到检索系统当中，也不得以任何其他形式或渠道进行传播（电子、机械、复印、录制或其他方式），也不得用于任何其他用途。TÜV南德意志集团享有本文主题事项的专利、专利申请、商标、版权或其他知识产权。除非TÜV南德意志集团明确在许可协议当中以书面形式表示，否则本文并未授予专利、专利申请、商标、版权或其他知识产权权利。除非版权法规定，否则在获得书面许可前，禁止复制、改变或翻译本文内容。© TÜV南德意志集团 - 2022年 - 版权所有 - TÜV SÜD是TÜV南德意志集团注册商标。

## 免责声明

我们已经采取一些必要合理措施，确保内容信息的质量、可靠性和准确性。但是，TÜV南德意志集团针对本函内部任何第三方内容不承担任何法律责任。TÜV南德意志集团并未以明示或暗示的方式，对本函所含信息的准确性或完整性作出任何担保或声明。本函旨在为具体事项或主题提供一般信息，但内容不算详尽。因此，本函信息并不构成任何咨询或专业建议或服务。如果在本函内寻找任何主题事项相关信息建议，适用情况下，请直接与我们联系，提出具体疑问，或从专业人员那里寻求建议。未获TÜV南德意志集团书面同意前，不得在任何其他刊物或材料当中复制、引用或提及本函信息。所有版权归TÜV南德意志集团所有©2022年



Greater China

# 表明核安全承诺

<https://www.tuvsud.cn/zh-cn/industries/energy/nuclear-power>

[info.cn@tuvsud.com](mailto:info.cn@tuvsud.com)

## 创享价值，激发信任

作为一家安全、可靠和可持续发展解决方案等方面值得信赖的合作伙伴，TÜV南德意志集团提供测试、认证、审核及知识服务。自1866年以来，集团始终致力于通过保护人类、环境和资产免受相关技术风险的影响。公司在全球设立了1,000多个分支机构，并拥有超过25,000名员工，通过实现市场准入和控制风险，TÜV南德意志集团激发对现实和数字世界的信任，以创造更安全、更可持续发展的未来。

## 我们在大中华区的分支机构：

### TÜV南德意志大中华集团

#### 总部 上海

上海市恒通路151号3-13

层 200070

电话：+86 021 6141 0123

#### 上海测试中心

电话：+86 021 6037 6300

电话：+86 021 6037 9100

#### 无锡

电话：+86 510 8820 3737

#### 宁波

电话：+86 574 2786 6658

#### 金华

电话：+86 579 8288 8708

#### 南京

电话：+86 025 8779 0058

#### 合肥

电话：+86 551 6537 8730

#### 台州

电话：+86 576 8966 1886

#### 苏州

电话：+86 512 6809 5318

#### 成都

电话：+86 028 8592 0656

#### 杭州

电话：+86 571 8111 0758

#### 常州电池实验室

电话：+86 519 8109 8308

#### 常州轨道实验室

电话：+86 519 8123 9872

#### 武汉

电话：+86 027 8571 4927

#### 郑州

电话：+86 371 5538 2208

#### 重庆

电话：+86 023 8980 9513

#### 北京

电话：+86 010 6590 6186

#### 天津

电话：+86 022 8319 2258

#### 青岛

电话：+86 532 8503 0106

#### 青岛实验室

电话：+86 532 8513 1716

#### 大连

电话：+86 411 8230 4203

#### 沈阳

电话：+86 024 8668 5949

#### 长春

电话：+86 431 8462 9833

#### 香港

电话：+852 2776 1323

#### 香港元朗实验室

电话：+852 2443 3774

#### 深圳

电话：+86 755 8828 6998

#### 深圳实验室

电话：+86 755 3359 5385

#### 广州

电话：+86 020 3832 0668

#### 广州测试中心

电话：+86 020 3817 0580

#### 厦门实验室

电话：+86 592 7706 188

#### 厦门思明区办公室

电话：+86 592 7311 931

#### 东莞

电话：+86 769 2168 7092

#### 长沙

电话：+86 731 8458 5815

#### 柳州

电话：+86 772 3858 696

#### 台北

电话：+886 2 2898 6818

#### 台中

电话：+886 4 2486 3966

\*上述部分服务可能由于当地法规的原因而无法在您的地区提供。欢迎您与我们联系咨询。

