

文章编号：0258-0926(2014)02-0098-03

# 新建核电厂重要安全要求探讨

张 琳<sup>1,2</sup>, 贾 祥<sup>2,3</sup>, 严天文<sup>2</sup>, 李文宏<sup>4</sup>, 李 春<sup>5</sup>

1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京, 100084; 2. 环境保护部核电安全监管司, 北京, 100035;

3. 中国原子能科学研究院, 北京, 102413; 4. 深圳中广核工程设计有限公司, 广东深圳, 518031;

5. 环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082

摘要：针对新建核电厂几个重要安全要求和安全改进方向进行分析，在安全目标实现、厂址安全评价、内外部事件设防、严重事故预防和缓解，以及堆芯、安全壳和仪表控制系统的设计及工程技术优化等方面提出技术观点，为我国新建核电厂的设计、建造及安全改进提供参考。

关键词：核安全；新建核电厂；安全要求；探讨

中图分类号：TL413.1 文献标志码：A

## 0 引 言

福岛核事故后，国际社会普遍认识到现有核电厂的安全仍需进一步改进。为了适应我国核电发展的需要，国家核安全局发布了新的核安全规划，对新建核电厂提出了更高的安全目标和安全要求。本文就新建压水堆核电厂的几个重要安全要求从技术上进行探讨。

## 1 安全目标

核电厂既要满足《核动力厂设计安全规定》的辐射防护目标和技术安全目标，还需全面落实核安全规划中提出的安全目标值，即每堆·年发生严重堆芯损坏事件的概率低于  $10^{-6}$ ，每堆·年发生大量放射性物质释放事件的概率低于  $10^{-7}$ 。

对新建的核电厂，力争从设计上降低大量放射性物质释放的可能性，消除可能导致大量或早期放射性释放的事件，将安全壳中存在大量放射性物质的事故工况置于受控制状态，保持安全壳的功能。

## 2 纵深防御

核电厂的设计和运行应贯彻纵深防御原则，对由厂内设备故障或人员活动及厂外事件等引起的各种瞬变、预计运行事件及事故提供多层次保护。采用多层次纵深防御措施，保证各层次纵深防御措施的有效性和各层次间的独立性，提高多

层次防御能力。贯彻预防和缓解平衡安全理念，保证在防护失效的情况下能通过采取适当的缓解措施减轻事故后果，以保护人员和环境安全<sup>[1]</sup>。

## 3 安全分析

应采用确定论和概率论分析方法开展核电厂的安全分析，充分考虑确定论和概率论的分析结果，以证明核电厂的设计是平衡的，采取的纵深防御措施有效，能够达到安全目标，且满足放射性释放的管理排放限值、所有运行状态下的剂量限值、事故工况下可接受的限值。

应完成核电厂功率运行、停堆状态下、内部和外部事件的二级概率安全分析，包括乏燃料贮存池等设施；提供严重堆芯损坏的概率评价和需要场外早期响应的大量放射性释放的风险评价，以确认与概率安全目标的一致性。

## 4 安全功能和安全分级

应确定属于安全重要物项的所有构筑物、系统和部件，包括仪表和控制软件，根据其安全功能和安全性进行安全分级。其设计、建造和维修应使其质量和可靠性与分级相适应。在不同级别的构筑物、系统和部件之间提供合适的接口，以保证划分为较低级别的系统中的任何故障不会蔓延到划分为较高级别的系统。

对于执行严重事故预防与缓解功能的安全措

施和重要物项，设计中应进行特定安全考虑，以保证在相应事故工况下具备设计要求的可用性和可达性，并可通过分析、试验或检查等加以证明。

## 5 外部事件

结合厂址及周围区域的自然和社会环境特征，对可能影响核电厂安全的外部事件，包括地震、地质、洪水、气象等外部自然事件和飞机撞击、危险品爆炸等外部人为事件进行调查和评价，以确定厂址适宜性和抵御外部事件的设计基准。

核电厂抗震设计中应提供充分的安全裕度，以抵御地震事件的影响。核电厂应选择相对地震活动水平低的厂址，适当提高抗震设计基准，进行相应的地震概率安全分析或地震裕量评估，保证核电厂具有充分的抗震安全裕度<sup>[2]</sup>。

核电厂防洪设计应充分考虑极端洪水事件以及洪水因素组合产生的影响，而且尽可能考虑采用“干厂址”，并考虑适当的安全裕度，以确保核电厂的防洪安全。

福岛核事故后，超过设计基准的极端外部事件对核电厂安全的影响受到高度关注。对于超过设计基准的外部事件，应考虑适当的安全裕度，以提高核电厂抵御超过设计基准的极端外部事件特别是极端自然灾害的能力。

## 6 严重事故

福岛核事故后，国际上进一步认识到某些极低频度事件仍然可能导致堆芯的严重损坏。

应采用概率论、确定论和工程判断相结合的方法，确定可能导致严重事故的重要事件序列。可接受的措施不需要使用保守工程实践，可采用现实的、最佳估算的假设、方法和分析准则。对于选定的严重事故序列，应制定合理可行的预防和缓解措施并保持两者的平衡，增强预防和缓解比设计基准事故更严重或涉及更多故障事故的能力，尽量减轻严重放射性释放的后果。

针对严重事故，至少需考虑下列典型事项<sup>[3]</sup>：

(1) 研究全厂断电的事故场景和处理措施，保证核电厂在丧失厂外和厂内应急交流电源后能保持堆芯的持续冷却，不会导致堆芯严重损坏和不可接受的大量放射性释放。可采取的应对措施：在原厂址固定式附加电源的基础上，配置适当的移动电源和移动泵设备；增强厂外电源的可靠性，

优先考虑恢复厂外电源等。

(2) 采取适当措施，排除由于冷水或不含硼水的快速注入而导致的严重堆芯损坏，提高在停堆状态和安全壳打开状态下余热排出的可靠性。

(3) 采取可靠措施，避免高压堆芯熔融物喷射；根据厂址和构筑物条件评价熔融物与底板间的作用，确定合理的工程措施；采取措施防止氢气局部聚集，否则考虑局部氢气爆燃的影响。

(4) 考虑严重事故下保持安全壳完整性的措施，充分考虑预计发生的各种可燃气体的燃烧效应、严重事故下贯穿件隔离装置和安全壳气密闸门保持执行功能的能力、反应堆安全壳的排热以及控制放射性物质从安全壳向外泄漏的能力；对安全壳旁路型严重事故的可能性进行评价，并考虑适当的缓解措施。

(5) 制定严重事故管理指南(含乏燃料水池)，以指导核电厂对功率运行、低功率和停堆工况下的严重事故以及由于外部事件导致核电厂大范围破坏的情况进行处置。

## 7 堆芯安全设计

充分考虑堆芯中子注量率分布及其变化的探测手段、多样性的安全停堆手段、任何运行工况下堆芯具有负的功率反应性系数、堆芯余热排出和应急堆芯冷却等，确保有能力使处于运行状态和设计基准事故下的反应堆安全停堆，保证即使在反应堆堆芯处于最大反应性情况下，仍能保持停堆状态。

优先选用成熟或经验证的燃料元件，对于新开发的燃料元件，在核电厂正式采用之前应进行充分验证。为保证反应堆堆芯和燃料组件有适当安全裕量，在极限功率参数之上设计保留足够的裕量，包括堆芯偏离泡核沸腾比裕量和燃料线发热率裕量等。

## 8 安全壳系统设计

保证安全壳在设计基准工况下的完整性，尽可能降低安全壳在严重事故工况下的条件失效概率，提高严重事故下安全壳的包容能力。

对安全壳失效模式进行分析，确定主导事故序列。安全壳的失效模式一般为旁通、隔离失效、超压失效、底板熔穿等。

安全壳系统应按设计基准事故中的泄漏率不

超过规定的最大值的要求进行设计,并具有收集从安全壳泄漏出来的放射性物质,或使从安全壳泄漏出来的放射性物质得到滞留和衰变的措施。

分析严重事故下安全壳的极限承载能力,综合考虑氢气爆燃、高压熔堆、熔融堆芯与底板混凝土相互作用等严重事故作用的影响,通过弹塑性分析保证安全壳的应力和变形符合弹塑性准则,压力边界不会产生破裂,并关注安全壳贯穿件等薄弱环节,以确保安全壳的完整性和充分的设计裕量。否则,应考虑设置安全壳的超压保护,如采用过滤排放措施,以提高过滤效率。

## 9 仪表控制系统设计

设置能在正常运行、预计运行事件、设计基准事故和严重事故下对核电厂变量和系统进行全程监测的仪表,保证获取核电厂状态的充分信息。设置能测量所有影响裂变过程、反应堆堆芯完整性、反应堆冷却剂系统和安全壳完整性的主要变量的仪表,获取核电厂安全可靠运行所必需的任何信息。充分考虑预期工况、执行动作可利用的时间和操纵员的心理要求,有助于操纵员成功

地完成各种动作。各种安全动作应自动投入,以便在预计运行事件或设计基准事故开始的一段合理的时间内无需操纵员的干预。

安全仪表控制系统应具有与拟执行的安全功能相称的可靠性和可定期测试性,在实际可行的范围内充分考虑可试验性(包括自检能力)故障安全性能、功能的多样性、部件设计或工作原理的多样性等,以防止保护功能的丧失;应使用高质量和最佳实践的硬件和软件;应对系统进行独立有效的评价以验证和确认系统可靠性的可信度,在不能论证系统具有高可信度时,应具备保证执行保护功能的其他不同的手段。

参考文献:

- [1] WENRA RHWG. Report Safety of New NPP Designs[R]. March, 2013.
- [2] European Union. Communication on the Comprehensive Risk and Safety Assessments ("Stress Tests") of Nuclear Power Plants in the European Union and Related Activities[R]. Oct, 2012.
- [3] European Union. Technical Summary on the Implementation of Comprehensive Risk and Safety Assessments of Nuclear Power Plants in the European Union[R]. Oct, 2012.

# Discussion of Important Safety Requirements for New Nuclear Power Plants

Zhang Lin<sup>1,2</sup>, Jia Xiang<sup>2,3</sup>, Yan Tianwen<sup>2</sup>, Li Wenhong<sup>4</sup>, Li Chun<sup>5</sup>

1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China; 2. Department II of Nuclear and Radiation Safety Regulation of Ministry of Environmental Protection of P. R. China., Beijing, 100035; 3. China Institute of Atomic Energy, Beijing, 100035, China; 4. China Nuclear Power Design Co. Ltd. (Shenzhen), Shenzhen, Guangdong, 518031, China; 5. Nuclear and Radiation Safety Center of Ministry of Environmental Protection of P. R. China, Beijing, 100082

**Abstract:** This paper presents the analysis of several important safety requirements and improvement direction. Technical view of security goals on site safety evaluation, internal and external events fortification, serious accident prevention and mitigation, as well as the core, containment system and instrument control system design and engineering optimization, and etc are indicated. It will be useful for new plant design, construction and safety improvement.

**Key words:** Nuclear safety, New nuclear power plants, Safety requirements, Discussion

作者简介:

张琳(1978—),女,在读博士研究生。2004年毕业于清华大学化学工程与技术专业,获硕士学位。现从事核电安全监管工作。

贾祥(1980—),男,工程师,在读博士研究生。2004年毕业于武汉大学热能工程专业,获硕士学位。现从事核电安全监管工作。

严天文(1975—),男,工程师。2000年毕业于武汉水利电力大学材料加工工程专业,获硕士学位。现从事核电安全监管工作。

(责任编辑:马蓉)