

文章编号: 0258-0926 (2014)05-178-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2014.05.0178

核动力厂物项安全分级与设计扩展工况 物项质量要求

孙造占, 沈伟, 黄炳臣, 邓冬

环境保护部核与辐射安全中心, 北京, 100082

摘要: 为核动力厂物项进行恰当的分级是保证核动力厂具有良好安全性能和经济性能的重要手段。随着安全要求的不断提高以及设计理念的不断发展, 物项分级的理论和方法也得到了进一步的发展。核动力厂应针对某些极不可能发生的严重事故进行设计已逐步成为共识, 对“超设计基准”事故工况下需要保持安全功能的设备的质量要求随之成为焦点探讨问题。根据国内外相关实践和我国对新建核动力厂提出的更高安全目标以及国际上相关进展, 建议对我国相关法规标准进行相应修改, 并提出了相关物项质量要求的建议。

关键词: 核动力厂; 超设计基准事故; 安全分级; 安全相关; 设计扩展工况

中图分类号: X591 **文献标志码:** A

0 引言

随着核能利用技术的发展, 核设施及设备的设计、制造技术以及安全监管的理念和手段都发生了很大变化, 与之相应的安全分级理论和方法也出现了长足的发展。在密切跟踪国际上先进的安全分级理论和方法的基础上, 修改完善我国相应法规标准是非常必要的。

核动力厂严重事故的发生, 促使人们不断地完善纵深防御概念和应用, “超设计基准”工况正逐步纳入“设计扩展”工况的范围, 相应部分的物项(指构筑物、系统和设备的统称)质量要求也需要做出相应的调整。

1 纵深防御概念与应用的发展

核动力厂纵深防御从 3 个层次发展到 5 个层次^[1], 从工程设计的角度来看, 主要是所针对的假想事故不同。早期的纵深防御只设防到设计基准事故, 而目前纵深防御对“超设计基准事故”也有所考虑。尽管 HAF102—2004《核动力厂设计安全规定》^[2]要求“设计中还必须考虑核动力厂在特定的超设计基准事故包括选定的严重事故中的行为”, 但不必“采用保守的设计措施”, 也没有对其辐射剂量规定限值。针对严重事故的对策主要是事故管理, 设计仅考虑“对于能降低这些选定事件发生的概率或者当这些选定事件发生时

能减轻其后果的可能的设计修改或规程修改, 必须加以评价, 如属合理可行则必须实施这种修改。”

随着科学技术不断发展, 对核动力厂的安全设计提出了更高的要求。轻水堆核动力厂欧洲用户要求(EUR)^[3]提出, 必须在“传统的”3 层次基础上更好地应用纵深防御概念。EUR 从设计的初始阶段就考虑超出设计基准事故范围的设计扩展工况。国际原子能机构(IAEA)于 2012 年将这一规定写入其新的核动力厂设计安全要求^[4]。

2 核动力厂物项分级的实践与发展

2.1 我国目前核电厂主要堆型的安全分级

我国目前运行和在建核动力厂主要堆型是所谓的“二代加”压水堆, 其物项安全分级遵守或参考的法规标准主要包括: 我国的核安全法规 HAF102、核安全导则 HAD102/03^[5]、核安全技术文件 HAFJ0066^[6]、GB/T 17569^[7]、GB/T 15474^[8] 以及国外相关标准等。上述标准在安全分级方面的要求虽有差别但大同小异, 基本上沿用了美国国家标准 ANS 51.1^[9]的思路与方法。而 ANS 51.1 中安全分级部分的主要编制依据是美国的核安全管理导则 RG 1.26^[10]。

2.2 AP1000 堆型的安全分级

AP1000 被称为先进非能动型反应堆, 其物项分级没有完全采用 RG 1.26 和 ANS 51.1 的方法,

而是结合非能动安全设计的特点进行了相应的调整。主要改变是在设计基准工况内执行安全功能设备全部采用非能动设备，对应于“二代加”堆型的专设安全设施中的能动设备得以保留，但不再属于安全相关物项。虽然这些非安全相关物项对于达到安全目标不是必需的，但通过防止非能动安全系统不必要的启动而起到纵深防御的作用；非能动安全系统还缺乏足够的运行经验，把非安全相关能动设备作为安全系统的后备，也是另一个方向上的纵深防御。因此，美国核管会将上述非安全相关的物项纳入监管范围。AP1000 将非安全相关但附加相关核安全监管要求的物项定为 D 级。

为了适应非能动型核动力厂的需求，美国国家标准学会发布了新的轻水堆分级标准 ANS 58.14^[11]。

2.3 EPR 堆型的安全分级

EPR 将“复杂序列”和“严重事故”纳入设计扩展工况。在设计基准工况下执行的安全功能定义为 F1 功能，在设计扩展工况下执行的安全功能定义为 F2 功能。执行 F1 功能的物项和执行 F2 功能的物项的总体要求见表 1。EPR 型核电厂中部分执行 F2 功能的物项的质量要求对应于“二代加”核电厂中安全 2 级或安全 3 级的质量要求。

表 1 EPR 执行 F1 或 F2 功能物项的总体描述
Table 1 General Description for F1 or F2 Items of EPR

物项要求	功能类别	
	F1	F2
设计规范的应用	有	有
质量保证	有	有
运行工况的鉴定	有	有
抗震鉴定	有	逐个分析
定期试验	有	有
单一故障	有	无
实体和电气隔离	有	逐个分析
应急供电	有	逐个分析

2.4 IAEA 新的安全分级

文献[4]不再使用超设计基准事故的概念，取而代之的是设计扩展工况。文献[4]将设计扩展工况定义为“不在设计基准事故考虑范围但在设施设计过程中根据最佳估计方法学加以考虑的事故工况。出现这种工况时，放射性物质的释放被保持在可接受限值以内。设计扩展工况可包括严重事故工况”。针对设计扩展工况可能要求安全设施，

或扩大安全系统以维持安全壳完整性的能力。“必须利用设计扩展工况来确定安全设施的设计基准和防止产生这类工况或在这类工况产生后对其进行控制和减轻其后果所需的所有其他安全重要物项的设计基准”。

为了使新的设计要求得到更充分的理解与落实，IAEA 于 2014 年发布了新的物项安全分级导则^[12]。该导则对物项的安全分级主要取决于物项被赋予安全功能的分类（表 2）。设计预期执行特定功能的物项被赋予的初始安全级别与其功能所属类别一致，可根据需要执行功能的时段对其进行必要的调整。

表 2 假设始发事件分析中的功能及其安全分类
Table 2 Functions Credited in the Analysis of Postulated Initiating Events and Their Safety Categories

安全评价中采用的功能	功能失效后果的严重程度		
	高	中	低
预计运行事件后达到可控状态的功能	安全 1 类	安全 2 类	安全 3 类
设计基准事故后达到可控状态的功能	安全 1 类	安全 2 类	安全 3 类
达到并维持安全状态的功能	安全 2 类	安全 3 类	安全 3 类
缓解设计扩展工况后果的功能	安全 2 类或 3 类	不分类	不分类

注：预期不会发生专设 DEC 功能失效而后果严重性为中或低的情况

2014 版 IAEA 导则中的另一个发展，是在基于上述功能分类的分级之外，给出了针对正常运行物项的分级依据。2014 版 IAEA 导则将这些物项称为设计措施，根据其失效可能直接导致的事故后果的严重性而直接划分到不同的安全级别。这实际上也是纵深防御在另一个方向上的进一步完善。

2.5 对我国核动力厂物项安全分级的建议

2.5.1 修改的必要性 最基本的物项安全分级是安全级与非安全级的区分，分别对应“安全相关”和“安全无关”。关于“安全相关”，引用最多的是美国联邦法规 10CFR50.2 的定义^[13]：安全相关的构筑物、系统和部件指在设计基准事件期间及之后，为确保以下目标而赖以保持功能的构筑物、系统和部件：反应堆压力边界完整性；反应堆停堆并维持安全停堆工况的能力；预防或缓解可能导致不可接受的厂外照射后果的能力。未划入“安全相关”的物项通常称为“安全

无关”物项。通常来说,“安全无关”会被理解为不属于安全监管的范围。这种划分虽然简单,但不完全符合纵深防御的核安全理念。

尽管一直以来“安全重要”和“安全相关”被混用,但两者之间存在着很大的区别。10CFR50附录A对“安全重要”物项的定义为“为设施运行但不给公众健康和带来过度风险而提供保障的构筑物、系统和部件”。可见,“安全级”或“安全相关”属于“安全重要”的一个子集^[14-15]。

HAF102中的“安全重要物项”与10CFR50附录A中的“安全重要物项”相对应,包括“安全系统”和“安全有关物项”。HAF102对核动力厂物项分级提出了比较全面和恰当的要求,但由于相关的规范标准将属于监管范围的“安全有关物项”划入带有附加要求的“安全无关”物项,很容易产生核安全监管机构随意对其职责范围以外的物项提出监管要求的误解。为避免曾经的争论一再发生,需要进一步修改完善原有的或重新制订新的安全分级核安全导则和规范标准。

2.5.2 建议修改的主要内容及可行性 从核安全基本原则出发,结合近年来国内外相关实践的发展与完善,建议对核动力厂物项分级相关的核安全导则和规范标准的修改与完善从以下几个方面入手。

(1) 取消“带有附加要求的安全无关物项”的级别名称,代之以“安全级”的某一级别名称。从实际操作层面上明确核安全监管的范围是所有“安全重要物项”,而非仅限于“安全相关”物项。对应于该级别的具体准则和划分方法也应逐步地配套、完善。我国近年来的核电建造和运行经验以及 AP1000 堆型核电厂在我国的建造实践,为这样的修改与完善奠定了坚实的基础。

(2) 将设计扩展工况物项纳入安全分级范围。完善的纵深防御应该覆盖设计扩展工况,这已在全世界逐渐形成共识,IAEA 相关要求和导则也已更加清晰和明确,EPR 堆型核电厂在我国的建造也证明了其可行性。

(3) 应将纵深防御第一层次的正常运行期间发挥安全功能的物项明确纳入安全分级的范围,这既有利于充分发挥其防止和降低始发事件的发生概率,也有利于降低下一层次安全设备的启动需求,使纵深防御更加完善。

(4) 明确允许恰当地使用概率论方法。鉴于

我国核动力厂目前概率安全评价的现状,在安全分级中引入概率论方法确实存在一定难度。但对于“安全重要”却不属于“安全相关”物项的分级,恰当使应用概率论的必要性大大提高;概率安全评价技术近年来在我国已经并继续迅速发展,为其更广泛的应用打下了很好的基础。

3 “超设计基准工况”物项质量要求

将原来的“超设计基准”物项纳入安全分级的范围,是为了规定其相应质量标准。IAEA 已不再使用“超设计基准工况”,而是将其纳入设计扩展范围,要求对于设计扩展工况设定恰当的设计规则和验收准则。EPR 堆型的实践中,对设计扩展工况设备和设计基准工况设备采用了类似于 SSG 30 的准则统一分级,对相关设备使用设备鉴定确认其质量,鉴定条件采用相应最佳估算结果。

虽然美国目前尚没有关于“超设计基准工况”设备的相关规范标准,但随着对文献[15]中“设计增强类”设备监管要求的进一步明确,预期 IAEA 相应的“要求”和建议也在美国得到落实。

我国的“核安全与放射性污染防治”十二五”规划及 2020 年远景目标”要求,“十三五”及以后新建核电机组力争实现从设计上实际消除大量放射性物质释放的可能性。这既需要进一步降低发生严重堆芯损坏事件的概率和发生大量放射性物质释放事件的概率目标值,同时必须以很高的可信度保证这些目标值的实现。将原来的“超设计基准工况”纳入设计扩展工况并提高其设备质量是提高实现核安全目标可信度的重要手段。建议参考我国台山核电厂的实践提出相应的要求。

4 结论

核动力厂纵深防御概念的应用,一直在不断的发展和完善过程中。IAEA 在核动力厂物项分级方面的最新发展体现了纵深防御在正常运行工况和设计扩展工况 2 个方向上的完善。

尽管国内外针对“安全相关”和“安全重要”的争论一直存在,但不论是美国的联邦法规还是我国的部门规章,都明确核安全监管的范围是“安全重要物项”而不仅限于“安全相关”物项。

我国目前核动力厂物项分级相关的核安全导则和规范标准,需要适应实践和理论上新的发展而进行修改完善。主要是应该涵盖正常运行工况物项和设计扩展工况物项。

从设计上实际消除大量放射性物质释放的可能性，要求以很高的可信度来保证更高安全目标的实现。因此，将原来的“超设计基准工况”纳入设计扩展工况，并对其明确比原来更清晰、更严格的质量要求是非常必要的。

参考文献:

- [1] International Nuclear Safety Advisory Group. Defense in depth in nuclear safety, INSAG 10[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1996.
- [2] 国家核安全局. HAF102—2004核动力厂设计安全规定[S]. 2004.
- [3] Western European Nuclear Regulator's Association. Report on safety of new NPP designs[R]. 2013.
- [4] International Atomic Energy Agency. Safety of nuclear power plants: design, SSR 2/1[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2012.
- [5] 国家核安全局. HAD102/03—1986. 用于沸水堆、压水堆和压力管式反应堆的安全功能和部件分级[S]. 北京: 中国法制出版社, 1988.
- [6] 国家核安全局. HAF·J0066—1997. 压水堆核电厂物项分级的技术见解[S]. 1997.
- [7] 国家质量技术监督局. GB/T17569—1998. 压水堆核电厂物项分级[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [8] 国家质量技术监督局. GB/T15474—1995. 核电厂仪表和控制系统及其供电设备安全分级[M]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [9] 美国国家标准协会. ANS51.1—1983Nuclear safety criteria for the design of stationary pressurized water reactor plants[S]. 纽约: 美国国家标准协会出版社, 1983.
- [10] NRC. RG1.26-1976 Quality group classifications and standards for water-, steam-, and radioactive-waste-containing components of nuclear power Plants[S]. Washington DC: Nuclear Regulatory Commission, 1976.
- [11] 美国国家标准协会. ANS58.14—2011 Safety and pressure integrity classification criteria for light water reactors[M]. 纽约: 美国国家标准协会出版社, 2011.
- [12] International Atomic Energy Agency. Safety classification of structures, systems and components in nuclear power plants, SSG 30[R]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2014.
- [13] NRC. Domestic licensing of production and utilization facilities, 10CFR50[S]. (1956-01-19)
- [14] NRC. NRC use of the terms, "important to safety" and "safety related", Generic Letter No.84-01[S]. 1984.
- [15] NRC Risk Management Task Force. A proposed risk management regulatory framework. NUREG 2150[R]. Washington DC: Nuclear Regulatory Commission, 2012.

Classification of Nuclear Power Plant Items and Quality Requirements on Design Extension Items

Sun Zaozhan, Shen Wei, Huang Binchen, Deng Dong

Nuclear and Radiation Safety Center, MEP, Beijing, 100082, China

Abstract: Adequate safety classification for nuclear power plant items is an important means to ensure good safety and economic performances of the plants. Classification theories and methods further develop with the continuous improvements in nuclear safety goals and plant design philosophy. It becomes a consensus that future nuclear power plants should be explicitly designed against certain severe accidents though their occurrences are considered extremely improbable, and therefore, the quality requirements on equipment expected to function under “beyond design basis” accident conditions becomes a focused topic of discussion. Considering both domestic and international experience, as well as the higher safety goal required for China's new nuclear power plants and related development in other countries, relevant modifications are proposed to be made to the current regulations and standards, and further, a set of equipment quality requirements is recommended.

Key words: Nuclear power plant, Beyond design basis, Safety classification, Safety related, Design extension conditions

作者简介:

孙造占(1963—),男,研究员。1992年毕业于大连理工大学水工结构工程专业,获工学博士学位。现主要从事核安全设备相关的审评和监督工作。

沈伟(1979—),男,高级工程师。2007年毕业于北京化工大学化工机械专业,获工学博士学位。现主要从事核安全设备相关的审评和监督工作。

黄炳臣(1974—),男,高级工程师。2003年毕业于北京化工大学化工机械专业,获工学硕士学位。现主要从事核安全设备相关的审评和监督工作。

(责任编辑:杨洁蕾)