

# 核电厂应急行动水平制定技术发展及应用

刘涛, 张立国, 曲静原

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

**摘要:**对核电厂应急行动水平(EAL)制定方法学和技术体系进行调研,并对国内核电厂制定的EAL进行分析。概要阐述了美国和国际原子能机构发展形成的EAL方法学和技术体系,对目前我国核电厂制定的EAL进行综述和评价,对核电厂EAL技术在我国的发展提出初步建议。

**关键词:**应急行动水平;应急计划;核电厂

**中图分类号:**TL364.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-6931(2010)04-0456-04

## Methodologies for Development of Nuclear Power Plant Emergency Action Level and Their Application

LIU Tao, ZHANG Li-guo, QU Jing-yuan

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Methodologies and technical system for development of emergency action levels (EAL) and their application in Chinese nuclear power plants (NPPs) were investigated. EAL methodologies and technical system developed by US and International Atomic Energy Agency (IAEA) were introduced firstly and then domestic NPPs application and practice were summarized and evaluated. Some pieces of suggestions were proposed to develop EAL guideline documents in China.

**Key words:** emergency action level; emergency planning; nuclear power plant

应急行动水平(EAL)是核电厂应急计划的重要内容之一,是核电厂进行应急状态分级的有效手段和依据。EAL制定方法学在美国三哩岛事故后逐渐形成,并通过经验反馈得以不断丰富和完善。目前,美国和国际原子能机构(IAEA)所提出的技术指南在国际上具有广泛认可的权威性和代表性。我国在核电厂应急行动水平研究和应用领域也已积累了较为丰富的实践经验。本文分析核电厂EAL制定技术在

美国和IAEA的发展以及在我国核电厂的应用实践,在此基础上对我国核电厂EAL的发展提出初步建议。

### 1 EAL技术的国际概况

#### 1.1 美国的EAL制定技术

20世纪70年代,美国根据原子能法和总统声明及其附件的要求,由核管会(NRC)和联邦应急管理机构(FEMA)一起负责建立和颁布

放射性应急响应计划准备的相关导则<sup>[1]</sup>。EAL 制定技术可通过在此过程中发布的一系列代表性文献来阐述,这些重要文献是 EAL 发展的里程碑,记载了逐步形成的 EAL 方法学。国内相关文献对此过程中发表的代表性著作进行了解读<sup>[2-3]</sup>,在此不再赘述。

NRC 最终形成了包含 EAL 在内的完整技术体系,并规定了一套通用的 EAL 分类方法(图 1)。NRC 提出的 EAL 识别类将反应堆中的放射性物质作为危险源,按照纵深防御理念,从防止放射性释放的非能动措施(F 类)到为屏障提供支持的能动系统(S 类),再到放射性环境监测(A 类)层层深入,对于影响反应堆安全的外部事件(自然因素和人因)则在 H 类中体现。在发展过程中又逐步将停堆风险分析的成果和存在的各种放射性物质形态反映到 EAL 中,提出了 C、D、E 类 IC/EAL,最终形成了现在的 7 类 IC/EAL<sup>[4]</sup>。其中,C 类 EAL 考虑了冷停堆和换料期间因冷却剂装量和衰变热去除能力不同而带来的反应堆燃料安全问题,将此状态下的系统故障单独列出。D 类 EAL 是针对核电厂停止运行后,产生的乏燃料继续在电厂的水池中贮存一段时间的情况而提出的,D 类 EAL 中的永久性卸料电站本质上是一乏燃料贮存装置,其 EAL 的基础是贮存乏燃料的水池。E 类 EAL 主要针对为贮存乏燃料和其它放射性材料而专门设计建造的独立乏燃料贮存装置的应急事件,乏燃料干式存储罐是此类 EAL 的研究对象之一。

美国采用矩阵表和文字描述相结合的方式表述 EAL。矩阵表用于给出导致各种应急等级的应急初始条件(IC),再通过文字描述列出每条 IC 相应的 EAL、适用运行模式和制定依据等。

### 1.2 IAEA 的 EAL 制定技术

IAEA 发表的 EAL 相关技术文件吸收了美国的研究成果,对美国提出的 EAL 方法学给予了认可。

成体系的 EAL 列表最早出现在 IAEA-TECDOC-955 中<sup>[6]</sup>。EAL 用于在核反应堆事故工况下确定公众的防护行为以及控制应急工作人员剂量的技术程序中,进行事故分级。该文件将应急状态分为 3 级:报警、场区应急、总

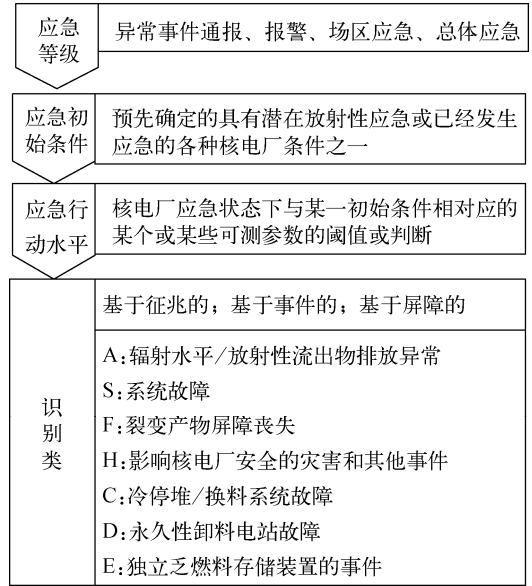


图 1 美国 EAL 体系框架

Fig. 1 American EAL system framework

体应急,且分别给出了运行、备用、热停堆模式下和冷停堆模式下的事故分级列表。在事故分级列表中,以事故分级程序的输入条件,即来自控制室的信息和电厂周围的剂量率为依据将事故进入条件分为 5 类:关键安全功能降级;裂变产物屏障丧失;辐射水平升高;保安事件、火灾、自然灾害和其它条件(如地震、洪水等)及乏燃料事件。事故分级时,首先确定进入事故工况的条件,然后对照事故工况进入条件的具体描述确定相应的应急状态,以找出最高应急等级对事故分级。此处,事故工况进入条件的具体描述可看作是 EAL。同时,文件也明确说明列表的内容需因厂而异修订,根据电厂的实际情况将其替换为该厂特有的仪表读数、设备状态或其它可观测量。IAEA-TECDOC-955 中的 EAL 体系如图 2 所示。

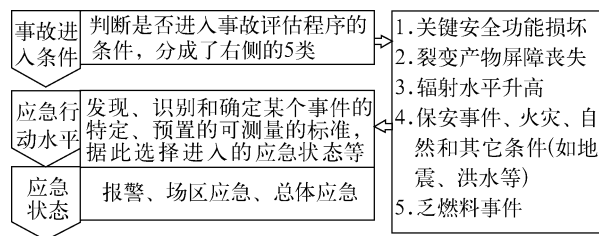


图 2 IAEA-TECDOC-955 的 EAL 体系

Fig. 2 IAEA-TECDOC-955 EAL system framework

IAEA 2002 年出版的安全标准 IAEA No. GS-R-2《核或辐射应急的准备与响应》<sup>[6]</sup>和 2007 年出版的安全导则 No. GS-G-2.1《核或辐射应急的准备安排》<sup>[7]</sup>以术语的形式给出了 EAL 的定义,且针对轻水堆核电厂将应急等级更新为 4 级:报警;设施应急;场区应急和总体应急。2008 年 10 月 16 日,IAEA 发布了《核与辐射应急准备和应急响应中使用的准则》征求意见稿(DS44),将 EAL 作为通用准则框架下的次级操作准则,并在其附录 II 中给出了轻水堆核电厂 EAL 的制定说明和示例,其中保持了轻水堆核电厂的 4 级应急等级设置,针对这 4 个应急等级给出了与 IAEA-TECDOC-955 中相似的 EAL 例表,分别用于核电厂运行、备用、热停堆模式时和冷停堆及换料模式下的应急等级划分。其中,还将 EAL 分为基于征兆和基于事件两类,并将事故进入条件中的辐射水平升高进一步区分为场区内辐射水平升高和场区外辐射水平升高。值得关注的是,在附录 II 中还明确说明,轻水堆 EAL 的制定可参照 NEI 99-01 第 4 版<sup>[8-9]</sup>。

## 2 EAL 技术在我国核电厂的应用

我国核安全法规 HAF0701(1989 年发布)规定我国核电厂应急状态分为应急待命、厂房应急、场区应急和场外应急 4 个等级<sup>[10]</sup>。国务院条例 HAF002(1993 年发布)沿用了该分级方法,并在其实施细则 HAF002/01 中明确要求“应根据核电厂设计特征和厂址特征提出 EAL”,且“在申请首次装料批准书时,提出初步制定的 EAL;在申请运行许可证时应提交修订后的 EAL 供审评”<sup>[11]</sup>。

根据法规要求,我国业已运行的核电厂均参照国际上通行的 EAL 技术指南,制定了各自的 EAL。其中,大亚湾和岭澳核电厂的 EAL 编制主要参考了 NUREG-0654<sup>[1,11]</sup>。秦山核电厂(秦山一期项目)的 EAL 编制参照了 NEI97-03、NEI99-01 和 IAEA-TECDOC-955<sup>[3]</sup>。田湾核电厂 EAL 的技术基础也是 NEI97-03、NEI99-01 和 IAEA-TECDOC-955,同时在制定过程中又根据电厂设计特点进行了必要调整。秦山第三核电厂采用加拿大加压重水堆技术,电厂设计与压水堆有着很大区别,其

EAL 的制定在参照美国和 IAEA 关于压水堆 EAL 制定的相关技术文献基础上,也考虑了重水堆堆型的设计特点。

总结各核电厂制定的 EAL,重点关注了如下 4 个方面内容。

1) 应急状态等级的划分。各核电厂均采用了 HAF002 中的分级方法,将应急状态分为应急待命、厂房应急、场区应急和场外应急 4 个等级。对于应急等级的描述则参照了 NUREG-0654 和 NUMARC/NESP-007 中的说法。

2) 应急初始条件和 EAL 的定义。各核电厂均采用了 NUMARC/NESP-007 中给出的定义。秦山核电厂在该部分还说明了识别类的含义。

3) 核电厂应急状态分级初始条件和 EAL。各核电厂均以 IC/EAL 矩阵表的形式给出了应急状态分级下 4 个识别类 A、S、F、H 的 IC 和 EAL 实例,但矩阵表的形式和内容略有差异。例如,大亚湾和岭澳核电厂将 IC 写在了相应的 EAL 栏中,并在此部分对 IC 定义和 IC 与 EAL 的使用进行了简要说明。另外,除 A、S、F、H 4 类外,大亚湾和岭澳核电厂还有相应于 C、D 和 E 类的 IC 和 EAL。秦山第三核电厂和田湾核电厂的矩阵表采用应急等级由左至右逐级升高的排序,并使用不同的填充颜色进行区分。与秦山第三核电厂和田湾核电厂不同,秦山核电厂的矩阵表中应急等级由左至右逐级降低,且将同类 IC 归并在同一子表中,并以 IC 类来索引这些子表。

4) 应急状态分级初始条件和 EAL 的使用说明。各核电厂在此部分主要对使用 IC 和 EAL 过程中的应急状态升级、降级和终止进行说明,但侧重点有所不同。秦山第三核电厂和田湾核电厂在该部分加入了“值长判断”的说明,而秦山核电厂在此处针对多重事件分级和离散事件分级、运行状态进行了较为详细的说明。

除上述 4 个方面内容外,秦山第三核电厂和田湾核电厂还在制定过程中给出了相关的核电厂运行重要性能参数和曲线。大亚湾和岭澳核电厂作为多堆厂址,专门说明了事故情况下相邻核电站之间的影响,并在裂变产物屏障丧失(F 类)EAL 中使用了多事件判断逻辑图,清

晰说明多事件的处理方式。以上核电厂的 IC/EAL 基本情况列于表 1。

表 1 国内核电厂 IC 和 EAL 统计

Table 1 Summary of domestic NPP ICs / EALs

核电厂 IC 和 EAL	S 类	F 类	A 类	H 类	合计	
秦山核电厂	IC	20	6	16	15	57
	EAL	25	32	42	39	138
秦山第三核电厂	IC	32	20	8	15	75
	EAL	49	25	29	27	130
田湾核电厂	IC	33	16	14	16	79
	EAL	39	35	30	28	132
大亚湾和岭澳核电厂 <sup>1)</sup>	IC	26	17	8	16	84
	EAL	32	33	21	33	148

注:1) 大亚湾和岭澳核电厂还有 C 类 11 个 IC, 19 条 EAL; D 类 5 个 IC, 9 条 EAL; E 类 1 个 IC, 1 条 EAL

### 3 关于我国 EAL 制定技术发展的建议

美国 NRC、FEMA 及 IAEA 制定 EAL 的方法论和技术指南综合了国际上事故分析(特别是严重事故分析)和概率风险评价的研究成果以及几十年来的核电厂运行经验反馈,并不断完善,已成为指导 EAL 的制定和审评的重要依据。相比之下,我国核电厂应急初始条件和 EAL 的研究工作开展得相对较晚。我国核电技术发展的多样性丰富了在该工作领域的实践内容,我国的核电厂 EAL 制定也储备了相当的技术基础和经验。同时也应看到,因缺乏对核电厂 EAL 的指导,各核电厂的 IC/EAL 在内容和格式上仍存在一定差异。

因而,充分利用美国和 IAEA 的文献资料,结合我国核电厂具体实践特点,于当前制定指导我国核电厂 EAL 制定工作的技术文件是适宜的。另一方面,制定 EAL 技术指导文件也便于规范和管理国内核电厂的 EAL 制定。

### 4 结语

EAL 与核电厂设计特点、厂址特征甚至核电厂的人力资源配置等密切相关。建议技术指导文件应在应急计划框架下充分体现 EAL 的技术要素,即应急状态分级、应急初始条件、识别类及核电厂的运行模式。同时,还应考虑到 EAL 本身的特点,即与核电厂应急计划的协调性、与特定电厂特征的相依性,以及预先确定、应用便捷等特点。另一方面,鉴于我国核电发

展的多样性,制定的 EAL 技术指导文件还应在保证技术普适性的同时,适当给予其应用的灵活性。

### 参考文献:

- [1] NRC, FEMA. Criteria for preparation and evaluation of radio logical emergency response plans and preparedness in support of nuclear power plants, NUREG-0654 FEMA-REP-1, Rev. 1 [R]. Washington D C: NRC, FEMA, 1980.
- [2] 施仲齐,王醒宇,李俊峰. 制定核电厂应急行动水平的方法学[J]. 辐射防护,2001,21(4):201-207. SHI Zhongqi, WANG Xingyu, LI Junfeng. Methodology for developing emergency action levels of nuclear power plant[J]. Radiation Protection, 2001, 21(4): 201-207(in Chinese).
- [3] 杨洪润. 秦山核电厂应急行动水平研究[R]. 北京:原子能出版社,2005.
- [4] NRC. Methodology for development of emergency action levels, NEI 99-01, Rev. 5 (NUMARC/NESP-007)[R]. Washington D C: NRC, 2008.
- [5] IAEA. Generic assessment procedures for determining protective actions during a reactor accident, IAEA-TECDOC-955 [R]. Vienna: IAEA, 1997.
- [6] IAEA. Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency, GS-R-2[R]. Vienna: IAEA, 2002.
- [7] IAEA. Arrangements for preparedness for a nuclear or radiological emergency, GS-G-2. 1[R]. Vienna: IAEA, 2007.
- [8] IAEA. Criteria for use in preparedness and response for a nuclear or radiological emergency, DS44[R]. Vienna: IAEA, 2008.
- [9] NRC. Methodology for development of emergency action levels, NEI 99-01, Rev. 4 (NUMARC/NESP-007)[R]. Washington D C: NRC, 2003.
- [10] HAF0700 核电厂核事故应急管理条例[S]. 北京:[出版者不祥],1993.
- [11] 国家核安全局. HAF002/01 核电厂核事故应急管理条例实施细则之一:核电厂营运单位的应急准备和应急响应[S]. 北京:国家核安全局,1998.
- [12] 仲崇年,张鹏飞,苟全录,等. 田湾核电站应急行动水平的编制[C]//中国核学会 2007 年年会会议论文集.[出版地不祥]:[出版者不祥],2007:20-24.