

核电厂应急行动水平中“气载流出物异常”类 EAL 制定的探讨

王学新¹, 潘玉婷², 庄大杰¹, 孙树堂¹, 陈磊¹

1. 中国辐射防护研究院, 山西 太原 030006; 2. 环境保护部核与辐射安全防护中心

摘要: **目的** 对制定核电厂应急初始条件和应急行动水平(ICs/EALs)中的“气载流出物异常”类应急行动水平的相关问题进行探讨。**方法** 针对制定核电厂气载流出物类应急行动水平中必须注意的关键问题逐一进行了分析、讨论。**结果** 分析表明,延迟释放时间、核素释放份额、导出 EAL 单位变换等问题均会影响“气载流出物异常”类应急行动水平的导出结果。**结论** 气载流出物异常类应急行动水平的优先级较低而不适合作为决策的唯一判据,但其作为体现 EAL 多样性的一种指标,能够反映某些潜在事件的征兆。

关键词: 核电厂; 应急行动水平; 放射性流出物异常类; 气载流出物

中图分类号: R141 文献标识码: A 文章编号: 1004-714X(2020)04-0402-04

Discussion on the related issues in the EAL establishment of abnormal airborne radiological effluent of NPP

WANG Xuexin¹, PAN Yuting², ZHUANG Dajie¹, SUN Shutang¹, CHEN Lei¹

1. China Institute for Radiation Protection, Taiyuan 030006 China;

2. Nuclear and Radiation Safety Center, MEP

Abstract: **Objective** This paper discusses the relevant issues of formulating the initial conditions of emergency response and the levels of emergency response (ICs/EALs) for nuclear power plants, such as the level of "abnormal airborne effluents". **Methods** Some problems involved in the formulation of emergency response level for airborne outflow materials were discussed. **Results** The analysis shows that the delayed release time, the share of nuclide release and the transformation of EAL units could affect the derivation of the emergency action level of "abnormal airborne effluents". **Conclusion** The priority of emergency action level of abnormal airborne effluents is low, which is not the only criterion for decision-making, but it is an indicator of EAL diversity and can reflect the symptoms of some potential events.

Key words: NPP; EAL; Abnormal Radiological Effluent; Airborne Effluents

Corresponding author: PAN Yuting, E-mail: pyt263@163.com

核电厂应急计划是核电厂纵深防御的重要构成。当核电厂出现紧急情况时,应急指挥或当班值长依照预先制定的程序和指标,快速判断事故等级,宣布进入应急状态,启动应急预案。

在 IAEA TECDOC-955 中明确:应急初始条件(IC)和应急行动水平(EAL)是核反应堆事故工况下用于确定公众防护行为及控制应急响应人员照射的体系中进行应急状态等级划分的重要指标^[1]。IC 是预先确定的根据核电站发生或可能发生辐射紧急情况应进入某特定应急状态的一套初始条件^[2],其可以是基于“征兆的”(如超技术规范的一回路水位过低)、

基于“屏障的”(如一回路过破口)、基于“事件的”(如火灾)。EAL 定义为用于识别和确定应急等级而预置的、特定的、可观测的准则,即是对应于进入某种应急状态初始条件所确定的可衡量阈值水平。EAL 可以是仪表读数、设备状态、可测量参数、可确认的事件、分析的结果、应急运行规程的启用和其他应进入应急状态的情况。EAL 除了要具备“基于事件”或“基于征兆”的特点外,最重要的是必须具有“可观察的”和“可操作的”特性。

IAEA 的 IC 和 EAL 制定方法是以美国相关研究成果为基础建立起来的。早在 1992 年,美国核能及

资源管理会发布的 NUMARC/ NESP-007 第 2 版中提出,将清水反应堆核电厂的 IC 和 EAL 按照:辐射水平/放射性流出物异常- Abnormal Rad Levels/Radiological Effluent(简称 A 类)、裂变产物屏障损伤或恶化- Fission Product Barrier Degradation(简称 F 类)、系统或设备故障- System Malfunction(简称 S 类)、影响电厂安全的危害和其它条件- Hazards and Other Conditions Affecting Plant Safety(简称 H 类)等分为四种识别类^[3],在后期发布的导则 NEI 99-01(2008)中进一步推荐为七种识别类^[4],即增加了冷停堆/换料工况下系统或设备故障(C 类)、长期卸料情况下系统或设备故障(D 类)和与独立乏燃料贮存设施相关的事件(E 类)。在 EAL 体系中进一步把停堆风险分析结果和存在源项形态等反映进去。

在“A 类”识别类型中,有一组“基于放射性气载流出物异常”的 IC(简称“气载流出物异常”)是令人关注的。对于气载流出物异常类的 EAL 值则需要通过相关计算推导,才能给出利于操作员直观判断的数值水平。本文以下将针对该类 EAL 推导中的一些问题进行讨论。

1 气载流出物类 EAL 释义及推导方法

应急行动矩阵表(ICs/EALs 矩阵)是一个能直观反映各应急状态下 IC 对应 EAL 的矩阵,并在各核电站得到广泛应用。

ICs/EALs 矩阵针对不同的应急状态等级,按照识别类型划分,列出触发不同应急状态所对应的初始条件 IC 及对应的 EAL 阈值。NEI 99-01 中明确指出“对流出物异常类的 IC 应尽可能给出多种不同形式的 EAL”,且要便于决策者及时进行合理的应急分级。

我国核安全局自 2008 年开始组织进行适用于我国核电厂 IC 和 EAL 制定的技术体系研究,并完成了《压水堆核电厂应急行动水平制定(征求意见稿)》的制定。在充分学习和借鉴我国相关法规、美国核管会(NRC)和国际原子能机构(IAEA)技术文献的基础上,结合我国具体情况,提出了采用 A、S、F、H 等 4 种识别类的初始条件—应急行动水平制定方法^[5],并将 NEI99-01(Rev.5)的思想进行了吸收与合并,提出了我国应急行动水平制定的格式与内容。因此,各核电厂均是以 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,但矩阵表中的形式和内容间略有差异^[6]。

在《压水堆核电厂应急行动水平制定(征求意见

稿)》的附件中对 ICs/EALs 矩阵给出了明确的建议格式,附表 A 是针对识别类 A:放射性释放异常的 ICs/EALs,其与 NEI99-01(Rev.5)的 Table 5-A-1 提出的矩阵结构和基本内容相同,但对应于不同应急状态下的不同初始条件则给出了更具体的针对性 EAL 建议。例如对应于进入“场外应急(G)初始条件 IC-AG1”:在实际或预期排放时间内,任何非计划排放的气态放射性流出物,用实际气象条件计算出的场区边界处或场区边界处有效剂量大于 10 mSv,或甲状腺吸收剂量大于 100 mGy。其对应的应急行动水平可以采用多种形式表征,如:对气载流出物的监测数据、场区的辐射监测数据、场地巡测取样数据、实时剂量评价结果等形式的 EAL^[7]。但触发场外应急行动水平的监测阈值则通过计算导出的。

以 EAL1-AG1 为例,它对应于“场外应急初始条件 IC-AG1”,以“辐射监测仪表有效读数大于核电厂特定值”为指标,表征为平均气象条件下因事故释放气载放射性物质引致厂址边界人员“全身剂量超过 10 mSv 或甲状腺剂量超过 100 mGy”(GB 18871-2002 附录 E 中隐蔽通用优化干预水平),出现该应急行动水平则达到触发场外应急的初始条件。但一方面“全身剂量超 10 mSv”或“甲状腺剂量超 100 mGy”并不是个可直接获取的测量值,它需要通过“核电厂特定值”这个可直接观测指标去触发;另一方面,EAL 必须给出一个量化阈值,而不能如 NUMARC/NESP-007 中采用的如“快速”、“明显”等非量化表述。

因此,要给出 ICs/EALs 矩阵中的这些量化阈值,则需要对事故工况气载放射性释放后果进行计算,得到释放浓度与人员剂量间的关系,再根据干预水平反推导出 EAL(核电厂特定值)。国际上有很多种软件均适用于做该类计算,如 InterRAS 和 RASCAL 等。但在软件计算中仍需注意气象参数、释放参数,以及释放距离与适用扩散模式等方面的选取和考虑^[8],这些在文中不做论述。以下文中将对推导气载流出物类 EAL 有较大影响的一些因素进行讨论。

2 对气载流出物类 EAL 推导相关问题的探讨

2.1 延迟释放和核素衰变对流出物中核素比份的影响 EAL 是厂界人员辐射剂量对事故工况下放射性排放浓度的反映。不同释放核素对人员的辐射影响不同。需要注意的是,在不同停堆时刻释放的流出物中核素比份的变化将会对导出 EAL 结果带来明显影响。实际上,事故中流出物释放的时间难以确定,其

释放可能在停堆前或停堆后的不同时刻。

通常可认为在停堆前,堆内各种放射性核素基本稳定,即达到放射性平衡状态。因此如停堆前释放的源项可以参照堆芯寿期末的核素组成。

对停堆后释放,由于流出物中的短寿命核素存

在,在一定时间内短寿命核素会快速衰减。因此释放时间相对于停堆时间,其延迟释放时间将导致源项中各核素比分发生显著变化,当然导出的 EAL 也就存在差异。以气态碘为例,图 1 给出在不同延迟释放时间后不同碘同位素在总活度中份额的变化。

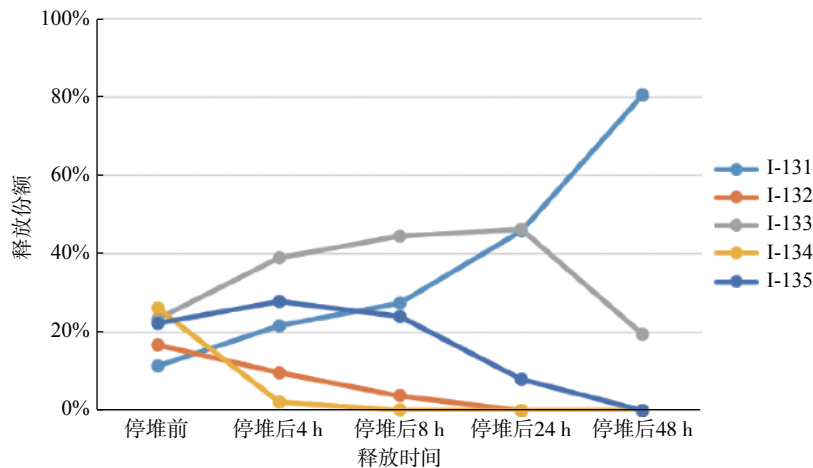


图 1 不同延迟释放时间后碘同位素的活动份额变化

从气态碘同位素随释放时间延迟的衰变情况看,碘同位素中¹³¹I 的份额随释放延迟的时间增大。在停堆前¹³¹I 占总活度的份额只有 11%,停堆 24 h 后的份额已达到 42%,而在停堆 48 h 后的份额竟然增大到 80% 以上。对于惰性气体或粒子类气溶胶素同样存在停堆后各核素比份快速变化的情况,因此在推导 EAL 中必须考虑延迟释放对气载释放物的比份影响。

2.2 源项及关键核素选择 其次应考虑对源项核素做适当的选取。通常直接采用反应堆平衡循环寿期末的堆芯核素组成是保守的。考但虑到堆芯中核素多达数十种,逐一核素做推导计算工作量巨大,因此应根据核素的辐射特性、释放特点等因素选取代表性核素。

考虑到核电站气载流出物的监测系统通常以碘、惰性气体、粒子类气溶胶等几类做为监测对象,因此 EAL 值以此为据制定才有意义。例如,以气载总碘浓度值作为判断场界人员的甲状腺剂量是否达到通用干预水平的 EAL。对惰性气体和气溶胶粒子亦采用类似分析。对气溶胶粒子的放射性浓度水平作类似计算分析时,建议主要以剂量贡献权重大的几种核素来推导,如 I、Cs、Te、Sr 等,以减少计算量。如对象是重水堆型核电站,则还要考虑有关氙的监测及剂量估算^[9]。

2.3 核素释放率的选择 除了延迟释放时间会导致气载释放浓度的比份变化外,制定 EAL 时同样要符合不同反应堆型实际情况。因为不同核电站堆型、事故工况、燃料类型和核素特性的影响下的核素释放份

额存在差别,也会对 EAL 推导产生影响。

美国 NRC 发布的 NUREG-1465 给出了典型压水堆(PWR)堆型在不同事故工况阶段下核素释出率的推荐值^[10],如表 1 所示。

表 1 PWR 各事故阶段的不同核素组别释出份额

核素类别	包壳失效 (气隙释放阶段)	堆芯熔化 (释放压力容器内)	压力容器熔穿 (释放压力容器外)
惰性气体	5%	95%	0
卤素	5%	35%	25%
碱金属	5%	25%	35%
钡、锶	0	2%	10%
贵金属	0	0.25%	0.25%
碲组	0	5%	25%
铯组	0	0.05%	0.5%
镅系	0	0.02%	0.5%

但对于如秦山三期核电站所采用的重水反应堆堆型,其事故工况下的气载放射性核素的释出率鲜见有文献数据支持。考虑到重水堆燃料组件棒径与 BWR 堆的较为接近,建议可参考 BWR 事故的核素释出份额。

2.4 导出 EAL 的单位变换 “直观反映”和“快速识别”是 EAL 的一个重要特点。因此,导出流出物类 EAL 必须能与该核电站流出物监测系统的监测对象及探测阈值相适宜^[11],因此存在需要将导出 EAL 值与监测系统所设定阈值的单位相统一^[12]。

以惰性气体为例,某些核电厂流出物在线监测系统惰性气体监测值,是以核素辐射能量指标“ $\text{Bq} \cdot \text{MeV}/\text{m}^3$ ”作为单位。而依据前述方法推导出的惰性气体应急行动水平则是以浓度“ Bq/m^3 ”作为参照指标的单位,这两者间单位的不同,将会影响决策者面对监测数据时的快速判断。

因此,在导出气载排放物浓度阈值后须考虑是否进行单位变换后才能发布作为 EAL。即,对惰性气体要结合各核素衰变时 γ 辐射能量($\text{MeV}/\text{衰变}$),将导出气载流出物的排放浓度单位转变为辐射能量浓度指标,才能使之与核电站的监测系统相适用。

3 讨论

在 EAL 使用中,应注意到流出物类 ICs/EALs 在确定核电厂应急等级过程中的优先级是较低的。事故分级时将优先遵照核电厂运行工况的初始条件和应急行动水平进行判断。如未发现异常征兆,则原则上不会仅仅依据气载放射性流出物 ICs/EALs 单独做出判断。究其原因,一是因为在重大事故或事件中,流出物超量排放往往不是初始事件,而是其他工况的反映,仅依靠流出物监测数据做出的判断是不充分的;其二,严重事故工况下,实际监测到的流出物数据难以做到全面反映和完整地采集,而可能对决策准确性造成影响;其三,导出 EAL 的不确定度较大,在导出过程中相关源项、排放、气象等参数的不确定度较大,可能会有数量级的变化。当剂量评价结果与 EAL 导出结果不一致时,一般优先采用评价结果,但不能因此而导致应急行动的延迟。

总之,不同形式的 ICs/EALs 为应急指挥或当班值长做出全面正确地判断提供了支持,气载流出物异常类的 IC 和 EAL 也是反映核电厂运行安全水平的一种重要参考指标。它能在仅通过核电厂工况难

以做出事故分级判断的情况下提供多方位的依据;通过流出物类 IC 和 EAL 可以更充分地注意到各种潜在事件的征兆,以补偿对某类事件风险认识上的不足。

参考文献

- [1] International Atomic Energy Agency.. Generic Assessment Procedures for Determining Protective Actions during a Reactor Accident[R]. TECDOC-955, 1997.
- [2] U. S. Nuclear Regulatory Commission. Emergency Action Levels for Light Water Reactor[R]. Nureg-0818, (Rev. 3), 1998.
- [3] Nuclear Management and Resources Council. Methodology for Development of Emergency Action Levels[R]. NUMARC NESP-007, 1992.
- [4] U. S. Nuclear Regulatory Commission. Methodology for Development of Emergency Action Levels[R]. NEI 99-01, Rev. 5, 2008.
- [5] 张建岗,金莉,汤荣耀,等. 重水堆核电厂应急行动水平的改进[J]. 辐射防护通讯, 2014, 34 (1): 8-11.
- [6] 刘涛,张立国,曲静原. 核电厂应急行动水平制定技术发展及应用[J]. 原子能科学技术, 2010, 44 (4): 456-459.
- [7] 董信芳,李航,丁世海,等. “华龙一号”核电厂烟囱气态流出物取样系统验证的试验与分析[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27 (1): 52-57.
- [8] 修正,黄顺祥,周龙. 关于辐射剂量与健康效应风险评估方法的探讨[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26 (3): 288-291.
- [9] 王孔钊,王悦,肖薇,等. 秦山三核重水堆核电站职业内照射监测报告[J]. 中国辐射卫生, 2018, 27 (4): 294-298.
- [10] U. S. Nuclear Regulatory Commission. Accident Source Terms for light-water Nuclear Power Plants. Final Report[R]. NUREG-1465.1998.
- [11] 陆建峰,何俊,刘长军,等. 三门核电厂外围辐射环境监督性监测系统介绍[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26 (2): 230-233.
- [12] 许浒,陈艳,吴荣俊,等. 核电站蒸汽发生器传热管泄漏监测总 γ 通道报警阈值研究[J]. 中国辐射卫生, 2017, 26 (3): 351-356.

收稿日期:2020-01-21 责任编辑:赵婉兵