

辐射事故应急预案的模糊综合评价

李小飞,张谈贵,张学东,王海山,高健夫,王福军
(甘肃省核与辐射安全中心,甘肃 兰州 730020)

摘要:为增强辐射事故应急预案编制及修订的科学性、针对性和实用性,依据辐射事故应急预案的特点和法律法规要求,基于层次分析法构建目标层、准则层和方案层三级层次结构,提出9项准则和39项评价指标并计算权重,建立辐射事故应急预案综合评价模型及计算方法。层次分析结果表明,监测和预警、应急监测、恢复行动等3项指标在应急预案制修订过程中权重较大。应用该方法对某辐射事故应急预案实例进行评价,评价结果为一般,与实际情况相符。

关键词:辐射事故;应急预案;模糊综合评价;层次分析法

中图分类号:X946;TL73 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2020)01-0004-04

Fuzzy Comprehensive Evaluation of Radiation Accident Emergency Plan

LI Xiao-fei, ZHANG Tan-gui, ZHANG Xue-dong, WANG Hai-shan, GAO Jian-fu, WANG Fu-jun
(The Center of Gansu Nuclear and Radiation Safety, Lanzhou, Gansu 730020, China)

Abstract: A three-level structure of target layer, criterion layer and scheme layer was constructed based on analytic hierarchy process, according to the characteristics of radiation accident emergency plan and the requirements of laws and regulations, for enhancing the scientificity, pertinence and practicability of the formulation and revision of the emergency plan. 39 evaluation indicators derived from 9 criteria were put forward and their weights were calculated. The results showed that the three indicators which were monitoring and early warning, emergency monitoring and recovery action weighted higher in the formulation and revision of the emergency plan. This method was applied in a living example. The evaluation result was ordinary, which was consistent with the actual situation.

Key words: Radiation accident; Emergency plan; Fuzzy comprehensive evaluation; AHP

随着放射性同位素技术在国民经济领域^[1-2]应用的日益广泛,辐射事故风险也随之增加。据统计,2004—2013年间,我国共发生各类辐射事故244起^[3],如近年来发生的南京放射源丢失^[4]、浙江义峰山放射性石料流向民居住宅等辐射事故、事件。应对辐射事故、事件的应急预案重要性日益凸显,完备、有效、可操作的应急预案将为辐射事故、事件的应急处理、现场处置工作提供有效指导,避免造成经济损失和社会恐慌。《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等法律法规对生产、销售、使用放射性同位素与射线装置的核技术利用单位编制辐射事故应急预案提出了明确要求,在预防辐射事故的发生及辐射事故的应急响应与处置中发挥了重要作用。然而,到目前为止还没有统一的

辐射事故应急预案编制规范、导则及评价体系,缺乏一套完善的辐射事故应急预案评估指标体系,编制的预案在监测和预警、应急组织机构和职责等权重较大的指标方面内容不完善,导致辐射事故应急演练、应急响应等后续工作缺乏可操作性,不利于配套工作的开展。

今在借鉴过往辐射事故经验和教训的基础上,按照我国原环境保护部规范性文件要求及美国环境保护署^[5]辐射事故应急预案编制框架,利用现有辐射事故应急预案资料并结合核技术利用单位

收稿日期:2019-05-11;修订日期:2019-11-25

基金项目:甘肃省科技计划基金资助项目(17YF1FA115)

作者简介:李小飞(1982—),男,河南新安人,高级工程师,硕士,从事辐射防护与辐射应急工作。

辐射事故应急实际进行完善, 尝试建立辐射事故应急预案模糊综合评价模型, 基于层次分析法对模型各指标进行排序, 得到指标在评价模型中的相对权重。对某辐射事故应急预案实例进行评价, 针对评价结果给出应急预案的修订建议, 避免应急预案编制和修订过程中的盲目性和随意性, 从而提高应急预案的可操作性, 为辐射事故应急预案的编制及实施提供参考。

1 辐射事故应急预案评价指标体系的建立

1.1 建立评价指标体系主要考虑的因素

(1) 与国际上辐射威胁等级、我国辐射事故分类体系保持一致。辐射事故多为突发事件, 主要为放射源丢失、被盗、失控, 或者放射性同位素与射线装置失控导致人员受到意外的异常照射, 大部分集中在核子仪、放射性测井、工业探伤及工业辐照等工业应用领域。根据 IAEA 安全导则^[6] 和我国辐射事故分类相关法律文件, 结合《INES 国际核和放射事件分级表使用者手册》^[7], 综合考虑辐射事故(事件)对人和环境的影响、对设施放射屏障和控制的影响及对纵深防御的影响, 建立辐射事故应急预案评价指标体系。

(2) 充分考虑辐射事故风险防控和隐患排查等对应急工作的影响。根据核技术利用单位辐射威胁等级, 在辐射事故风险确定后, 结合所处地理位置的人口密度等人和环境情况, 主要评估辐射事故应急预案中风险防控措施的实施和落实情况, 以及在作业过程中对存在的核与辐射安全隐患排查和治理情况, 将其作为预案设定的预警条件之一。

(3) 注重事故现场处置和事后恢复。过往辐射事故使用的处置方法多为密封放射源, 在包壳未破损的情况下, 主要是确保放射源安全收贮, 并进行表面污染监测和源罐确认, 涉及非密封放射源的辐射事故要做好现场去污和公众信息公开工作。

(4) 体现应急预案的完备性、可操作性、有效性和灵活性。根据应急预案在辐射事故中暴露出的内容不全、可操作性差, 以及对应急处置工作指导性不强的问题, 评价指标体系应体现应急预案的完备性、可操作性、有效性和灵活性。

(5) 可量化。由于辐射事故应急预案指标多为定性指标, 很难量化, 因而采用模糊综合层次分析法将定性指标转化为可量化的隶属度评价指标。

1.2 建立评价指标体系的程序

(1) 借鉴过往辐射事故的经验和教训, 构建辐射事故应急预案评价指标体系框架。对在世界范围内及我国发生的辐射事故充分调研, 了解辐射事故预防、现场及后期处置的经验、缺点和不足, 特别是以 1987 年巴西中部戈亚斯(Goias)州首府哥亚尼亚(Goiania)市一家废弃医院遗失旧辐射源造成放射性污染事故为例^[8], 参考 1959—1988 年核工业 30 年辐射事故^[9]、1988—1998 年全国辐射事故^[10]、2004—2013 年全国辐射事故^[3]及南京放射源丢失事故的处理方法, 同时结合文献调研, 构建辐射事故应急预案评价主要指标体系框架。

(2) 结合监管要求和核技术利用单位的实际情况, 完善辐射事故应急预案评价指标体系。在构建辐射事故应急预案评价主要指标体系框架的基础上, 一方面根据《放射性同位素与射线装置安全和防护条例》等文件规定、国内外应急预案相关研究文献、美国环境保护署^[5]关于应急预案的要求、全国核与辐射安全督查要求、核技术利用行业标准等辐射事故应急监管要求, 对评价指标体系进行完善; 另一方面, 结合全国核技术在工业、农业、医疗等行业应用的辐射事故应急预案编制和实施现状, 特别是在编制和实施过程中存在的难点和问题, 对评价指标体系进行补充和完善。

(3) 按照上述步骤拟定初步的辐射事故应急预案评价指标体系。

(4) 现场咨询和修改完善。组织行业内专家、辐射安全监管人员、核技术利用单位管理和技术人员, 对评价指标体系进行现场咨询, 从专业、监管及使用者的角度分别提出修改和完善建议。

(5) 建立辐射事故应急预案评价指标体系并进行量化评价。根据现场咨询修改意见和建议, 对拟定的评价指标体系进一步完善, 构建辐射事故应急预案量化评价的层级结构模型, 并应用于核技术利用单位辐射事故应急预案的量化评价。

基于以上原则和程序建立的辐射事故应急预案评价指标体系考虑了核技术利用单位的实际情况, 满足法律法规、技术标准规范、监管部门对辐射事故应急预案要素的要求, 从实用性出发, 采用层次分析法进行一致性判断。评价指标体系分为目标层、准则层和方案层, 其中准则层 9 项指标, 方案层 39 项指标(见表 1)。

表1 辐射事故应急预案指标权重

Table 1 Relative weight of index system of radiation incident emergency response plan

准则层	权重	方案/指标层	权重	组合权重	总排序
基本情况 u_1	0.036 7	单位概况 u_{11}	0.109 2	0.004 0	38
		环境概况 u_{12}	0.153 3	0.005 6	36
		环境保护目标 u_{13}	0.153 3	0.005 6	37
		辐射环境标准 u_{14}	0.584 2	0.021 5	15
应急组织机构 u_2	0.139 5	应急组织机构及职责 u_{21}	0.394 5	0.055 0	4
		应急队伍 u_{22}	0.070 6	0.009 9	34
		应急救援 u_{23}	0.199 3	0.027 8	13
		预案体系 u_{24}	0.335 6	0.046 8	7
辐射安全风险评估 u_3	0.058 4	放射源及射线装置情况 u_{31}	0.065 6	0.003 8	39
		辐射安全风险分析 u_{32}	0.133 0	0.007 8	35
		辐射事故分级 u_{33}	0.553 0	0.032 3	10
		可能发生的事事故类型 u_{34}	0.248 4	0.014 5	28
预防及预警 u_4	0.143 2	放射源监控 u_{41}	0.104 7	0.015 0	26
		预防和预测 u_{42}	0.258 3	0.037 0	9
		监测和预警 u_{43}	0.637 0	0.091 2	1
应急响应 u_5	0.188 2	分级响应 u_{51}	0.103 4	0.019 5	18
		通知与启动 u_{52}	0.068 7	0.012 9	29
		联络与信息交换 u_{53}	0.105 9	0.019 9	17
		指挥和协调 u_{54}	0.153 0	0.028 8	12
		现场处置 u_{55}	0.098 8	0.018 6	19
		应急监测 u_{56}	0.377 4	0.071 0	2
		安全防护 u_{57}	0.092 8	0.017 5	22
后期处置 u_6	0.131 7	应急终止 u_{61}	0.114 0	0.015 0	27
		调查与评估 u_{62}	0.405 4	0.053 4	5
		恢复行动 u_{63}	0.480 6	0.063 3	3
应急能力保持 u_7	0.119 2	宣传和培训 u_{71}	0.106 0	0.012 6	30
		预案演练 u_{72}	0.436 1	0.052 0	6
		设施设备检查维护 u_{73}	0.129 2	0.015 4	25
		预案和程序修订 u_{74}	0.141 0	0.016 8	23
		责任与奖惩 u_{75}	0.103 7	0.012 4	31
		预案备案 u_{76}	0.084 0	0.010 0	33
应急保障 u_8	0.118 6	资金保障 u_{81}	0.388 0	0.046 0	8
		应急物资装备保障 u_{82}	0.151 2	0.017 9	21
		通信与信息保障 u_{83}	0.266 8	0.031 7	11
		应急能力评价 u_{84}	0.194 0	0.023 0	14
公众沟通 u_9	0.064 5	公共宣传 u_{91}	0.319 1	0.020 6	16
		信息公开 u_{92}	0.242 8	0.015 7	24
		公众参与 u_{93}	0.157 1	0.010 1	32
		舆情应对 u_{94}	0.281 0	0.018 1	20

2 辐射事故应急预案评价指标权重计算

辐射事故应急预案评价指标权重采用层次分析法^[11]计算。层次分析法将难以量化的指标评价过程数学化,将人的主观因素量化,将多指标问题转化为单指标问题,最终把系统分析归结为最低层相对于最高层和分层的重要性排序问题。具体计算步骤如下^[12-14]:①建立阶梯层次结构模型;②进行专家咨询,构造各层次判断矩阵;③求解矩阵的最大特征根和特征向量,采用 MATLAB 程序和

YAAHP 软件计算;④依据特征向量,计算各指标相对权重向量;⑤层次单、总排序及一致性检验。经计算,各指标权重见表1。由表1可见,准则层权重较大的3项指标分别为应急响应、预防及预警、应急组织机构,方案层权重较大的3项指标分别为监测和预警、应急监测、恢复行动。

3 辐射事故应急预案综合评价模型

模糊综合评价是将模糊数学与层次分析法相

结合的一种系统评价方法^[15-17],其在专家咨询的基础上,将辐射事故应急预案的各因素层次化,构造模糊一致性判断矩阵并计算指标权重,最后运用模糊综合评价方法得到最终的评判结果。具体步骤如下:①确定因素(指标)集。该评价的指标集为表1中辐射事故应急预案评价指标体系,权重分别为 $W, W_1, W_2, W_3, W_4, W_5, W_6, W_7, W_8, W_9$ 。②确定评价等级及相应的标准。根据辐射事故应急预案的编制水平,选择好、较好、一般、较差、差共5个等级组成评价集。③通过单因素评判得到隶属度向量 r_i ,形成隶属度矩阵 R_i 。④确定因素集权重向量 B_i ,对评价集归一化,形成因素评价矩阵 B 。⑤计算综合权重向量 C 并进行评价。

4 应用实例

以兰州市某核技术利用单位编制实施的辐射事故应急预案为例,邀请10位专家对该预案的评价指标 u_j 按照5个等级进行评判,综合评价向量 $C = (0.0549, 0.2073, 0.4556, 0.2426, 0.0396)$ 。该辐射事故应急预案评价好的隶属度为0.0549,较好的隶属度为0.2073,一般的隶属度为0.4556,较差的隶属度为0.2426,差的隶属度为0.0396,综合评价结果为一般。

经分析,该辐射事故应急预案主要在准则层的预防及预警、后期处置、应急能力保持、公众沟通等方面存在缺陷或不完善,在方案层的应急监测、监测和预警、预案演练、公共宣传、环境保护目标等方面存在缺陷或不完善,导致最终评价结果为一般。该应急方案还有待于进一步完善和改进,评价结果与实际相符。

5 结语

(1)在借鉴过往辐射事故经验和教训的基础上,根据监管要求,结合核技术利用单位辐射事故应急预案资料及专家咨询,建立辐射事故应急预案评价指标体系,为辐射事故应急预案的编制、修订、评价及相关编制指南的制定提供科学依据。

(2)将模糊层次分析法应用于辐射事故应急预案的综合评价,并对兰州市某核技术利用单位编制的辐射事故应急预案进行评价,评价结果为一般,与实际相符。该评价方法简便通用,计算结果较为客观和稳定,具有一定的应用价值。

(3)该研究建立的辐射事故应急预案评价指标体系虽然经层次分析法检验具有较好的一致性,但是受评价者个人主观因素的影响,仍然具有一定的局限性,还需要在实践中不断完善。

[参考文献]

- [1] 韦正,宋永忠,黄昕,等. 移动 γ 射线探伤辐射安全风险与对策[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(3):1-4.
- [2] 颜耕,周磊,陈玲. 同位素技术在环境科学研究中的应用进展[J]. 环境监测管理与技术,2018,30(2):1-4,10.
- [3] 康玉峰,张志刚. 2004—2013年全国辐射事故汇编[M]. 北京:中国原子能出版社,2015:1-30.
- [4] 周启甫,陈栋梁,周晓剑,等. 南京¹⁹²Ir放射源辐射事故应急调查及分析[J]. 中华放射医学与防护杂志,2014,34(8):561-562.
- [5] EPA. Radiological emergency response plan[M]. Washington D. C.; USEPA,2017:1-50.
- [6] IAEA. Method for the development of emergency response preparedness for nuclear or radiological accident[M]. Vienna: IAEA,1997.
- [7] 国际原子能机构和经合组织核能机构. INES国际核和放射事件分级表使用者手册[M]. 维也纳:国际原子能机构,2012.
- [8] IAEA. The radiological accident in Goiania[M]. Vienna: IAEA,1988.
- [9] 潘志强. 核工业辐射事故汇编[M]. 北京:原子能出版社,1993.
- [10] 卫生部卫生法制与监督司,公安部三局. 全国放射事故案例汇编(1988—1998年)[M]. 北京:中国科学技术出版社,2001.
- [11] SAATY T L. The analytical hierarchy process, planning, priority setting, resource allocation[M]. New York: Mc Graw, Inc., 1980:287.
- [12] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津:天津大学出版社,1988:160-165.
- [13] 张炳江. 层次分析法及其应用案例[M]. 北京:电子工业出版社,2014.
- [14] 孙宏才,田平,王莲芬. 网络层次分析法与决策科学[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [15] 于志鹏,陆愈实. 模糊层次综合评价法在企业安全评价中的应用[J]. 中国安全生产科学技术,2006,2(3):119-121.
- [16] 姚靖,李清芳,张永江,等. 黔江区饮用水源地水质模糊综合评价研究[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(2):31-35.
- [17] 邵帅,邵秀权,夏锦梦,等. 基于模糊综合模型的湿地沉积物重金属污染评价[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(6):45-49.

本栏目编辑 姚朝英