

核电厂应急准备的代价利益分析

Cost/Benefit Analysis of Nuclear Power Plant Emergency Preparedness

刘志轩/LIU Zhi-xuan, 曲静原/QU Jing-yuan, 曹建主/CAO Jian-zhu

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084

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

[摘要] 简要介绍了核电厂应急计划区的划分方法和国际上先进堆应急计划的安全要求; 阐述了应急准备代价利益分析的原则思想, 并介绍了构建的分析模型; 最后给出了应急准备代价和利益比较的结果。

[关键词] 应急计划区; 应急准备; 代价利益分析

[中图分类号] TM623

[文献标识码] A

[文章编号] 1000-7857(2006)08-0050-04

Abstract: The paper briefly introduces the method of emergency planning zone division for nuclear power plants and international safety requirements of emergency planning for advanced reactors. The principle of cost/benefit analysis for emergency preparedness was explained, and the analysis model was presented. The results of the comparison between cost and benefit of emergency preparedness were shown.

Key Words: emergency planning zone; emergency preparedness; cost/benefit analysis

CLC Number: TM623

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2006)08-0050-04

1 前言

为了保证在发生核事故时能迅速采取有效的行动以保护公众, 在核设施周围需要建立应急计划区。在应急计划区内需要制订应急计划并做好应急准备。应急响应是核设施安全保障的一个重要措施。保障应急响应能力的应急准备, 包括建立应急组织, 编制应急计划及执行程序, 准备应急设施、设备, 以及进行人员的培训和演习等。应急准备的费用和应急计划区的大小有着直接关系。有数据表明, 应急计划区的半径减小一半, 应急准备初始投入的费用可以降低很多^[1]。也有研究显示, 应急计划区的半径加大会使碘化钾贮存管理的代价利益比增加^[2]。随着核电厂安全水平的不断提高, 特别是先进反应堆安全特性的增强, 核工业界希望缩小或者取消核电厂场外应急计划区的设定。本文先用确定论方法, 从代价利益分析的角度对核电厂的应急准备进行了参数研究; 之后用概率论的方法对核电厂应急准备的代价利益进行了研究。借助 PC COSYMA 程序系统完成^[3-4]计算。

2 核电厂应急计划区的划分

2.1 划分方法

在确定核电厂的应急计划区时, 既应考虑设计基准事故, 也要考虑严重事故, 以保证所确定的应急计划区内的应急准备可以应付不同事故的潜在后果。确定应急计划区的一般方法是, 确定考虑的事故类型及源项, 计算事故可能导致的辐射剂量, 并与规定的干预水平或行动水平进行比较, 从而确定应急计划区的范围^[5]。本文研究的应急计划区为烟羽应急计划区, 确定烟羽应急计划区的安全准则可以查看国标中的具体要求, 这里将不再展开讨

论。

2.2 国内外应急计划区的划分现状

核电厂应急计划区的划分, 不仅与核电厂发生事故时可能的释放源项和环境条件有关, 还受到经济、政治、技术等条件影响。目前拥有核电厂的多数国家建立 2 种应急计划区, 即烟羽应急计划区和食入应急计划区; 有些国家只建立烟羽应急计划区。

按照我国应急管理条例的规定, 核电厂周围应建立烟羽应急计划区和食入应急计划区, 而烟羽应急计划区又分为内区和外区。我国各核电厂应急计划区的大小列在表 1 中^[6-7]。对于有可能向场外释放大量放射性物质的核设施, IAEA 提出建立 3 个应急计划区, 分别是预防行动区 (PAZ)、紧急防护行动计划区 (UPZ)、长期防护行动计划区 (LPZ)。在预防行动区, 紧急防护行动已经制定好, 并且在宣布总体应急后可以马上实施, 其目标就是在释放前采取防护行动来充分降低确定性健康效应的风险; 在紧急防护行动计划区, 要做好准备以便根据事故监测结果迅速实施紧急防护措施; 在长期防护行动计划区, 要提前做好准备来有效实施防护行动, 以减少地面沉积和食物摄取带来的长期剂量^[8]。

2.3 先进堆应急计划区的安全要求及研究现状

先进堆可以将严重事故的发生概率限制在很低的水平上, 同时也可以使严重事故的潜在后果大大低于目前的反应堆, 这样需要采取场外应急的反应堆严重事故的发生概率就会很低, 从而可以大大减小应急计划区的大小。世界上一些国家相继提出了先进堆的设计要求, 其中一个重要方面就是简化或者消除对于场外应急计划的要求^[9]。美国用户要求文件 (URD), 要求先进轻水堆电厂的安全设计特性能够保证足够简化的场外应急计划, 不需要采取

收稿日期: 2006-04-26

作者简介: 刘志轩, 男, 北京市海淀区清华园清华大学核能与新能源技术研究院, 硕士研究生, 主要研究方向为核电厂应急的代价利益分析; E-mail: liuzx03@mails.tsinghua.edu.cn

曲静原(通讯作者), 男, 清华大学核能与新能源技术研究院, 研究员, 主要研究方向为核安全与辐射安全;

E-mail: qujyuan@mail.tsinghua.edu.cn

干扰程度大(撤离等)的场外应急响应措施^[7]。南非在应急计划区的划分中,对于高温气冷堆(PBMR)采用了一组应急计划基准事件,并用事件的平均频率和后果对事件进行评估,使得应急计划区缩小到厂址的非居住区边界^[9]。

表 1 我国各核电厂应急计划区划分概况^[6-7]Tbl. 1 The emergency planning zone division profile of nuclear power plants in China^[6-7]

核电厂名称	烟羽应急计划区 (距离反应堆中心的半径)		食入应急计划区(km) (距离反应堆中心的半径)
	内区(km)	外区(km)	
大亚湾地区	5	10	50
秦山第一核电厂	3	7	30
秦山第二核电厂	5	7	30
秦山第三核电厂	5	7	30
田湾核电站	4	8	30
GB 推荐值	3-5	7-10	由事故后果评价结果确定

3 分析方法和模型

3.1 代价利益分析的原则思想

如果先进堆的安全性可以减小甚至取消场外应急计划区,那么场外应急通告和应急演习也可以减少甚至取消,这样将有利于减少核电厂的应急准备费用。但是场外应急不仅仅是技术上的问题,在相当程度上还是一个公众接受性的问题。对于目前运行的压水堆核电厂,可能也存在同样的问题。对应急准备可能带来的代价和利益进行广泛的参数研究,可以从代价利益分析的角度来探讨有利于应急计划区划分的合理性。

3.2 分析模型

代价利益分析,一般可用如下的数学形式描述^[10]:

$$X+Y=\min \quad (1)$$

就核事故后实施的防护行动的代价利益分析来说,式中 X 代表防护行动的代价, Y 代表辐射危害的代价当量。假设在没有实施防护行动的情况下,辐射危害的代价当量用 Y_0 表示;实施防护行动可防止的辐射危害的代价当量为 $Y_0 \cdot \eta$,即为防护行动带来的利益,可以用下式表示:

$$Y_0 - Y = Y_0 \cdot \eta \quad (2)$$

其中 η 代表辐射危害的降低效率。

现在引入应急准备的代价,应急准备初始投入的费用和应急准备平均每年的费用分别用 X_3 和 X_4 表示,那么核电厂在第 n 年发生事故并实施防护行动,总的代价 X_1 可用下式表示:

$$X_1 = X + X_3 + n \cdot X_4 \quad (3)$$

在没有应急准备的情况下,发生事故实施防护行动的总代价 X_2 在数值上等于 X (假设没有应急准备的情况下,防护行动的代价是一样的)。而在2种假设情况下,带来的利益是不一样的。

Y_1 代表在有应急准备的情况下实施防护行动带来的利益, Y_2 代表在没有应急准备的情况下实施防护行动带来的利益,两者之差就是由应急准备带来的利益。应急准备的代价和利益分别如(4)式和(5)式表述:

$$X = X_1 - X_2 = X_3 + n \cdot X_4 \quad (4)$$

$$Y = Y_0 - \eta \cdot Y_0 = Y_0 \cdot \eta \quad (5)$$

$$\eta = \eta_1 - \eta_2 \quad (6)$$

对于 Y_0 的计算可以由下式得出:

$$Y_0 = \alpha \cdot S \quad (7)$$

其中 α 代表赋予单位集体剂量的货币量(RMB/人·Sv), S 代表没有实施防护行动下的集体剂量(人·Sv),文中的剂量均为有效剂量。

在有应急准备的情况下,采取防护行动后可防止的集体剂量用 $S \cdot \eta$ 表示,在没有应急准备的情况下,采取防护行动后可防止

的集体剂量用 $S \cdot \eta_2$ 表示,由(5)式和(7)式得出:

$$Y = \alpha \cdot S \cdot \eta \quad (8)$$

如果考虑 α 因子随着个人剂量变化,那么受到不同照射的人群的集体剂量就会对应不同的 α 因子,应急准备带来的利益可用下式表示:

$$Y = \sum \alpha_i \cdot S_i \cdot \eta_i \quad (9)$$

上式根据个人剂量分布划分出若干区间,其中 S_i 代表区间 i 的集体剂量, α_i 代表该区间个人剂量水平对应的 α 因子。

4 参数研究和选取

4.1 计算条件

文中源项选用美国《反应堆安全研究》(WASH-1400)中的PWR1-PWR9源项数据^[11],核电厂周围的人口数据、气象数据和屏蔽因子都选用大亚湾核电厂的相关数据。在概率论的研究中,用分层取样的方法从大亚湾厂址1年的逐时气象观测数据中选取气象序列进行计算;在确定论的研究中,选择了1个气象序列进行计算,表2列出了该气象序列前10h的逐时气象数据。本文在参数研究中均用确定论的方法进行计算。

表 2 确定论的气象序列

Tbl. 2 Deterministic weather sequences

编号	风向(°)	大气稳定度	降雨速率(mm/h)	风速(m/s)	混合层高度(m)
1	225	D	0	6.0	625
2	67	E	0	3.1	625
3	112	E	0	3.4	625
4	157	E	0	2.9	625
5	22	E	0	0.8	625
6	112	E	0	3.6	625
7	112	E	0.5	3.4	625
8	180	E	0.25	3.4	625
9	180	E	0	3.4	625
10	135	E	0	2.2	625

注:风向以0°为北风,角度顺时针增加(180°为南风)^[12]。

4.2 应急准备费用

根据初步调研结果,假设我国有关核电厂的应急准备费用如下:核电厂应急准备初始投入的费用为5000万元,平均每年应急准备投入的费用为2000万元。

4.3 地面外照射积分时间

对地面外照射积分时间进行了初步研究。地面外照射积分时间由180d增加到365d,应急准备利益评估值也随之增大,但差别并不明显。在下面的计算中,地面外照射积分时间取为365d。

4.4 潜在剂量和预期剂量

预期剂量是公众在正常生活情况下,没有实施防护行动受到的照射剂量;而潜在剂量是比较保守的,计算条件是公众24h完全暴露在户外的情况。根据1997年大亚湾周围地区建筑物类型的分布特点和各种建筑物屏蔽因子的推荐值^[13],另外给出居留因子为0.8,则得到了大亚湾周围地区公众正常生活的屏蔽因子,其中烟羽外照射屏蔽因子为0.28,地面外照射的屏蔽因子为0.32。根据以上条件计算出来的预期剂量约为潜在剂量的50%。

4.5 参考水平 ID_0

对个人剂量超过个人剂量参考水平 ID_0 的人群进行评估。图1给出了PWR5源项 η 取0.5的应急准备利益评估值(α 为2万元/人·Sv),分别是以潜在剂量和预期剂量计算的事故后果。研究表明,应急准备利益评估值随着个人剂量参考水平 ID_0 的增加而减小,不同源项数据和气象条件计算的后果值减小的速度不尽相同,综合考虑个人剂量参考水平选择10~50mSv是比较合适的,本文后面的计算分析中参考水平 ID_0 取10mSv。另外,用潜在剂量和预期剂量分别计算出的结果,差别比较明显,不过在参考

水平 ID_0 不超过 10 mSv 的情况下, 二者的差别还是可以接受的。本文在后面的计算中, 都选择预期剂量进行计算分析。

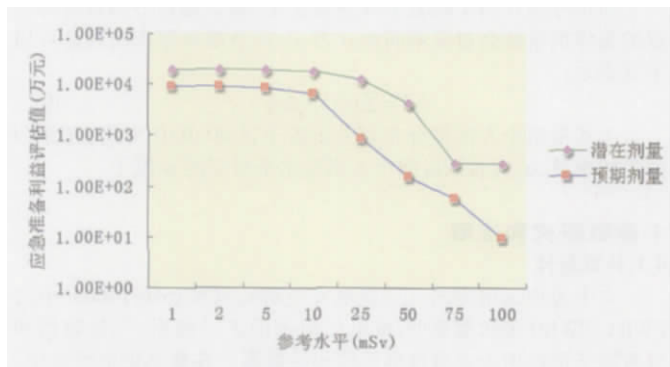


图 1 参考水平 ID_0 对应急准备利益评估值的影响
Fig. 1 Influence from reference level ID_0 to estimated value of emergency preparedness benefit

4.6 α 因子的研究

α 值的选取会直接影响应急准备利益评估值的大小。如果对于所有人群, α 值都是一样的, 那么根据计算条件得出的集体剂量, 只需要选择不同的 α 值即可改变应急准备利益评估值的大小。考虑到经济因素的制约, 本文 α 值的研究范围在 1 万~20 万元/人·Sv 之间。然而, α 值的确定不仅反映了人们对于辐射剂量的价值观念和价值判断, 同时也是一个涉及多方面因素的复杂问题。如果对受到不同辐射剂量的人群给予不同的考虑, 那么 α 值将随个人剂量的变化而变化, 用如下数学形式表达为:

$$\alpha = \begin{cases} \alpha_0 & (ID \leq ID_1) \\ \alpha_0 \times \left(\frac{ID}{ID_1}\right)^k & (ID > ID_1) \end{cases} \quad (10)$$

当个人剂量小于等于 ID_1 时, 假设 α 值取为常数 α_0 , 本文假设 α_0 这个基线值为 1 万元/人·Sv; 当个人剂量超过 ID_1 时, α 值随个人剂量的增长而增加。(10)式中当个人剂量超过 ID_1 时, α 值随个人剂量的增加按幂函数形式增大。指数 k 即为风险厌恶指数^[10], 如果风险厌恶指数 k 取 1, 那么 α 值随个人剂量线性增长; 如果风险厌恶指数 k 取 0, 那么 α 值即为常数 α_0 。

图 2 的计算源项为 PWR5 源项, η 取 0.5, 风险厌恶指数 k 取 1.2~1.5。从图中看到, 随着个人剂量水平 ID_1 增大(从 1 mSv 到 10 mSv), 应急准备利益评估值随之减小, 不同风险厌恶指数 k 条件下的应急准备利益评估值逐渐接近; 同一风险厌恶指数 k 下, ID_1 取 1 mSv 和 10 mSv 对应的后果值随着风险厌恶指数 k 的增大差异逐渐加大。在后面的计算中, ID_1 取 10 mSv。

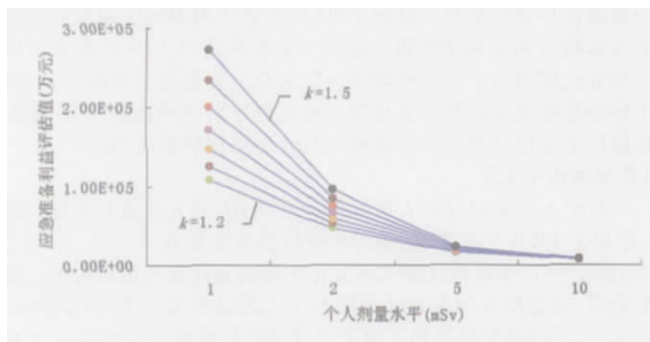


图 2 个人剂量水平 ID_1 对应急准备利益评估值的影响
Fig. 2 Influence from individual dose level ID_1 to estimated value of emergency preparedness benefit

5 计算结果

本文给出了用概率论研究方法计算的结果。考虑到整个事故源项谱和各种气象条件对结果的影响, 计算过程如下: 选定源项, 用分层取样法选取气象序列计算事故后果, 再根据每个气象序列的发生概率对事故后果加权平均; 同样对其他源项进行计算, 再根据每个源项的发生概率对事故后果加权平均。本文的计算中只考虑堆芯熔化事故序列(PWR1~PWR7), 事故发生的总概率为 6×10^{-5} /堆年^[14]。图 3 对应急准备利益评估值的研究是建立在对所有人群取同样 α 值的基础上。由于 α 值选择的不确定性, 图中给出了不同的 α 值结合 η 值的计算结果。同时, 图上标注了核电厂 10~40 年发生事故时应急准备的费用。

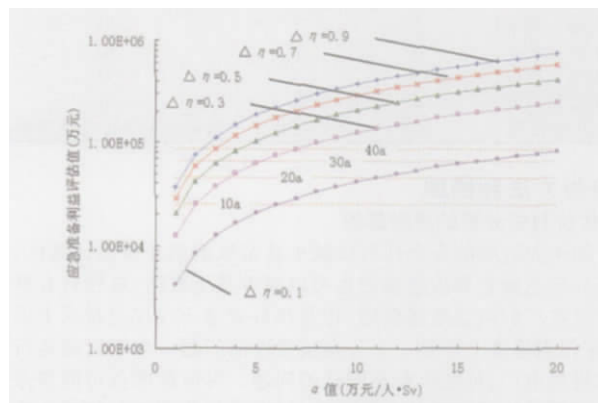


图 3 应急准备的代价利益比较 (α 值为常数)
Fig. 3 Comparison between cost and benefit of emergency preparedness (α value is a constant)

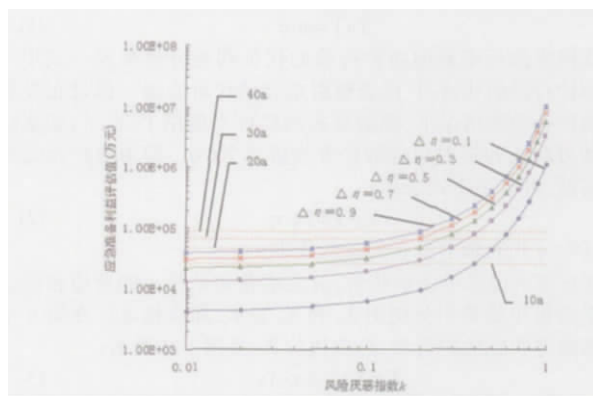


图 4 应急准备的代价利益比较 (α 值按照幂函数增加)
Fig. 4 Comparison between cost and benefit of emergency preparedness (α value increases exponentially)

应急准备利益评估值随着 α 值的增加而增大。在 α 值为 1 万元/人·Sv 的条件下, 对于较大的 η 值(如 0.7~0.9), 应急准备的利益评估值大于 10 年的应急准备费用; 在 α 值为 5 万元/人·Sv 的条件下, η 值在 0.5 以上时, 应急准备的利益评估值大于 40 年的应急准备费用; 如果在 α 值为 10 万元/人·Sv 的条件下, η 值在 0.3 以上时, 应急准备的利益评估值大于 40 年的应急准备费用。图 4 的 α 值是按照(10)式计算的。图中给出了不同风险厌恶指数 k 下的应急准备利益评估值, 和不同年份应急准备的费用。当风险厌恶指数 k 取 0.7 以上时, η 值取 0.1 的应急准备利益评估值就会超过核电厂 40 年的应急准备费用。对于更大的风险厌恶指数取值, 应急准备利益评估值很明显是远大于费用的。

风险厌恶指数的选取具有一定的主观因素, 反映了公众对辐射危害的厌恶程度, 公众对于辐射危害的厌恶程度越高, 应急准

基于 PROFIBUS 现场总线技术的测量和监控系统

Measurement and Control System Based on PROFIBUS Field Bus

王兴海/WANG Xing- hai, 王树威/WANG Shu- wei, 陈 靖/CHEN Jing

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 102201

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 102201, China

[摘要] 根据 TRPO 流程台架控制系统的特点和 PROFIBUS 现场总线技术的优势, 结合相关软件 WinPLC7 和组态王, 设计了流程台架的测量和监控系统, 实现了流程的自动化控制, 并且得到了良好的实验结果。

[关键词] TRPO; PROFIBUS 现场总线; 组态

[中图分类号] TP278

[文献标识码] A

[文章编号] 1000- 7857(2006)08- 0053- 03

Abstract: A measurement and control system based on PROFIBUS field bus was designed for TRPO process, with WinPLC7 and KingView 5.0. The experiments were carried out with automation control system and good results were obtained.

Key Words: TRPO; PROFIBUS field bus; configuration

CLC Number: TP278

Document Code: A

Article ID: 1000- 7857(2006)08- 0053- 03

1 引言

TRPO(Trialkyl Phosphine Oxides, 三烷基氧化膦) 流程是我国自主研发开发的高

放废液分离流程^[1-3], 其流程处于世界先进水平。进行设备流程台架实验是进行工程实施必要的阶段。我国核工业的自动化水

平和国外相比还有一定差距。随着工业自动化技术水平的不断进步, 现场总线技术的不断成熟和完善, 可靠性和安全性的不

收稿日期: 2005- 04- 26

作者简介: 王兴海, 男, 北京 1021 信箱清华大学核能与新能源技术研究院, 助理研究员, 主要研究方向为化学工程、核化学化工;
E- mail: wangxh110@163.com

备利益评估值就越大; 反之, 应急准备利益评估值就会越小。

6 结论

1) 计算结果表明, 在 α 值取为常数的情况下, 如果 η 值较低 (≤ 0.1), 应急准备的投入是不值得的; 如果 η 值较高 (≥ 0.5), 那么 α 值在 5 万元/人·Sv 以上时, 应急准备的投入是值得的。在 α 值随个人剂量变化的情况下, 当 $k \geq 0.7$ 时, 对于所分析的 η 值范围 (0.1~0.9), 应急准备的投入都是值得的。

2) 在本文的计算分析中, 参数的研究和选取对计算结果有着直接影响。对于地面照射积分时间、潜在剂量和预期剂量、 η 值这些参数, 对计算结果的影响判断起来比较简单。参考水平 ID_0 和 α 因子研究中的各个参数, 对计算结果的影响程度, 需要进行广泛的研究。

3) 本文尚存很多未尽的研究工作, 如参数的灵敏度分析等, 有待今后继续深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 施仲齐. 核电厂应急计划中若干问题和概念的讨论 [J]. 辐射防护, 1995, 15(1): 17- 24.
- [2] JRC, I E. OECD. Seminar on Risk & Emergency Zoning around Nuclear Power Plants [C]. EUR- 21734EN. Petten (NL): JRC- IE, 2005.

- [3] NATIONAL RADIOLOGICAL PROTECTION BOARD, FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE GMBH. PC COSYMA Version 2.0 User Guide[M]. EUR- 16240EN, NRPB- SR280.1995.
- [4] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. Cosyma: a New Programme Package for Accident Consequence Assessment[M]. EUR- 13028EN.1991.
- [5] 核电厂应急计划与准备准则——应急计划区的划分[S]. GB/T 17680.1- 1999.
- [6] 赵博, 邱林. 压水堆核电站应急源项的选定和应急计划区的划分[J]. 辐射防护通讯, 2003, 23(2): 6- 10.
- [7] 曲静原. 先进堆的应急计划——现实与挑战[C]//中国核学会核能动力学会理事会换届及第七届学术年会论文集. 21 世纪初核安全论坛第一次会议论文集. 北戴河, 2004: 54- 58.
- [8] IAEA. Method of the Development of Emergency Response Preparedness for Nuclear or Radiological Accidents [M]. IAEA- TEC- DOC- 953. Vienna: IAEA, 1997.
- [9] SECY- 02- 0139. Plan for Resolving Policy Issues Related to Licensing Non- light Water Reactor Designs [R]. Washington D. C., 2002.
- [10] 曲静原. 核事故应急干预水平代价利益分析中辐射危害代价的评估[J]. 辐射防护, 1995, 15(5): 350- 356.
- [11] 国家核事故应急委员会办公室, 中国人民解放军总参谋部防化部. 核事故应急响应教程[M]. 北京: 原子能出版社, 1993.
- [12] 胡二邦, 高占荣. 大亚湾地区建筑物辐射屏蔽因子的计算[J]. 中国核科技报告, CNIC- 01429.1999. (责任编辑 胡春华)