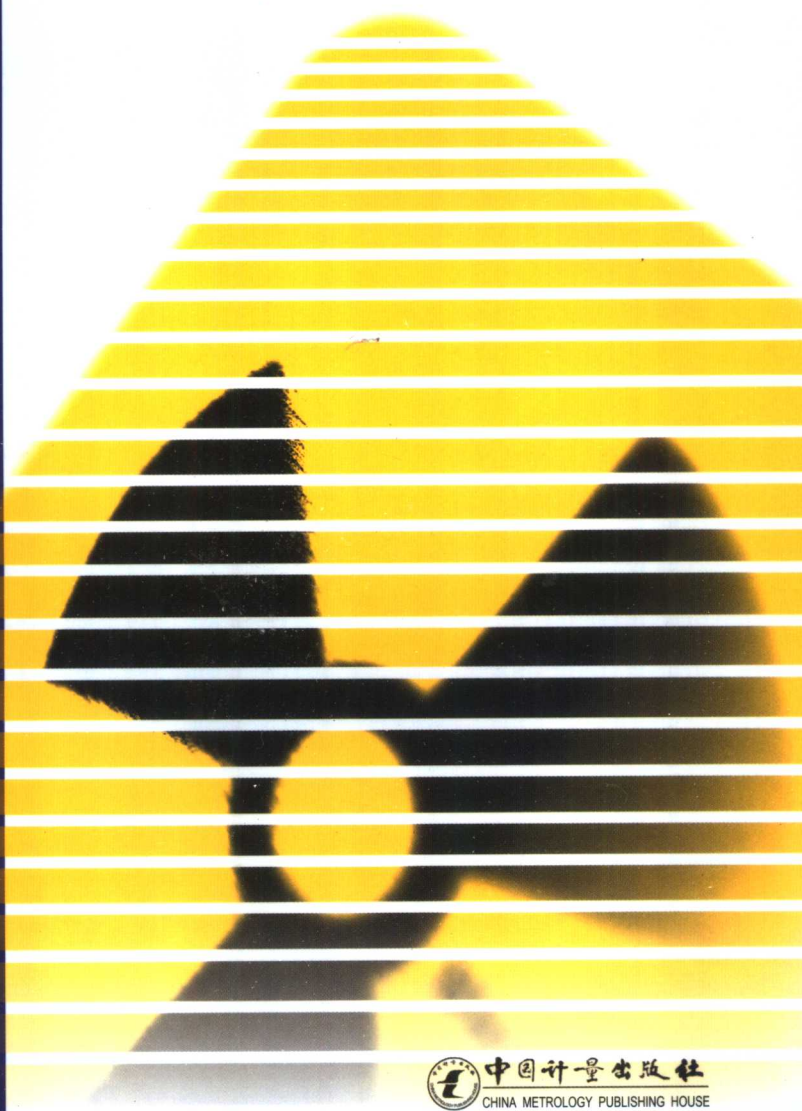


# 核与辐射事故应急决策 支持系统理论及其应用

张永兴 陆能枝 冯嘉礼 刘新河 陈超峰 曹希寿 编著



中国计量出版社  
CHINA METROLOGY PUBLISHING HOUSE

# 核与辐射事故 应急决策支持系统理论 及其应用

张永兴 陆能枝 冯嘉礼 刘新河 陈超峰 曹希寿 编著

中国计量出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

核与辐射事故应急决策支持系统理论及其应用/张永兴等编著. —北京:中国计量出版社, 2006. 11

ISBN 7-5026-2527-5

I. 核… II. 张… III. 放射性事故—决策支持系统 IV. TL73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 121978 号

## 内 容 提 要

本书是我国“九五”科研攻关项目“中国核应急决策支持系统研究与开发”科研成果的结晶,具有一定的理论与应用价值。它首先考查了目前世界上核应急决策支持系统研究的状况,特别是欧共体的状况,考察了我国核与辐射应急决策方法及决策支持系统的历史回顾、一般概念,讨论了核与辐射决策支持系统的分析和设计的方法。

本书是作者多年研究核与辐射决策支持系统的结果,它与欧共体开发的 RODOS 系统类似,但在操作控制系统上结合我国实际,进行简化并可微机化,在决策评估理论方面内容更多。全书共分为九章:概论、核事故与核应急状态的分级、规则库的研究与开发、预测子系统、对策子系统、核应急贝叶斯决策模型、核应急多目标决策模型、核应急决策模型、控制操作子系统的总体设计等。每章内容深入浅出,附有实例。

本书适合辐射防护、保健物理、计算机科学、管理科学与工程专业高年级学生和研究生用作教材和自学参考书,也可供有关教师、科研人员及工程技术人员参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话 (010) 64275360

<http://www.zgjl.com.cn>

三河市灵山红旗印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*

787 mm × 1092 mm 16 开本 印张 11.75 字数 284 千字

2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

\*

印数 1—1 500 定价: 33.00 元

# 前 言

本书是我国“九五”科研攻关项目“中国核应急决策支持系统研究和开发”(1996年~2001年)决策方法科研成果的结晶,具有理论与应用价值。此成果已经国家核应急办组织国内专家验收,并交付有关单位使用。

本书与欧共体开发的 RODOS 系统类似,但在操作控制系统上进行了简化并可微机化,在决策评估理论方面内容更多。

核事故(包括核武器事故、军用核设施事故和民用核设施事故)应急响应是当今社会极为关注的事情。美国于1990年出版了核武器事故响应程序手册(Nuclear Weapon Accident Response Procedures Manual),给出了核武器事故应急计划的概况及任务分工、实施程序,但缺乏决策优化这一部分。IAEA于90年代出版了关于民用核设施事故响应的专著:安全丛书72号(1991),安全丛书109号(1994)和TECDOC-698,TECDOC953,TECDOC955,TECDOC1092,ICRP也就此出版了第63号报告(1993)。这些书籍资料对核事故应急干预的原则和干预水平提出了指导,但都缺少应急响应的优化决策方法。

目前在世界核事故应急决策支持系统开发方面,美国研制开发了ARAC系统,日本开发了SPEEDI系统,意大利开发了ARIES系统,法国开发了ECRAN系统。它们研制开发的系统中仅有ASY子系统是健全的,最多只能做到三个层次的决策支持,而欧共体(包含德、英等20多个国家)开发的RODOS系统第3.0版本,虽有ASY、CSY和ESY子系统,设计说能做到四个层次的决策支持,但对于ESY子系统,RODOS 3.0版只给出了一个空的框图,缺少相应的程序模块。我们现在研制开发的核事故应急决策支持系统,已做到了四个层次的决策支持。

开发核事故应急决策支持系统,不仅对核事故应急决策具有明显的实际应用价值,而且在化工厂事故、火灾(如森林火灾)等事故应急处理决策方面同样具有实用意义。

我国核应急的三级(国家、地方、核电厂)应急体系已经组成,一旦发生核事故,领导人(指挥人员)急需科学的决策支持。本书在决策理论和决策软件开发应用方面具有指导意义。

出版此书,希望对于我国决策理论用于计算机实时在线,边缘学科发展以及核应急工作的深入开展起到一定推动作用。

编著者

2006年8月

# 目 录

<b>第 1 章 概论</b> .....	( 1 )
1.1 核应急决策支持系统总体结构概述 .....	( 1 )
1.2 各子系统的基本功能 .....	( 2 )
1.3 参考文献 .....	( 5 )
<b>第 2 章 核事故与核应急状态的分级</b> .....	( 6 )
2.1 核事故的分级 .....	( 6 )
2.2 核应急状态分级 .....	( 8 )
2.3 核事故分期 .....	( 10 )
2.4 参考文献 .....	( 10 )
<b>第 3 章 规则库的研究与开发</b> .....	( 11 )
3.1 干预规则库的开发 .....	( 11 )
3.2 干预的基本规则 .....	( 12 )
3.3 核应急防护的干预行动 .....	( 32 )
3.4 参考文献 .....	( 41 )
<b>第 4 章 预测子系统</b> .....	( 42 )
4.1 气象预报数据程序包 PAD .....	( 42 )
4.2 快速线性流风场模式 LINCOM .....	( 46 )
4.3 解方程的方法 .....	( 53 )
4.4 大气扩散烟团模式 (RIMPUFF) .....	( 63 )
4.5 高斯烟团模型和分段烟羽模型混合体 (ATSTEP) .....	( 69 )
4.6 参考文献 .....	( 78 )
<b>第 5 章 对策子系统</b> .....	( 79 )
5.1 对策子系统 (CSY) 的组成 .....	( 79 )
5.2 模拟与时间相关应急行动法 .....	( 80 )
5.3 潜在剂量 .....	( 80 )
5.4 无应急行动个人剂量计算 .....	( 81 )
5.5 事故释放 2 天内预期剂量 .....	( 82 )

5.6	事故释放后各网格居民第 $l$ 小时起隐蔽 2 天的剩余剂量 .....	( 83 )
5.7	事故释放后第 $l$ 小时起隐蔽 2 天的可避免剂量 .....	( 84 )
5.8	事故释放后各网格点居民第 $l$ 小时起撤离 7 天的剩余剂量 .....	( 85 )
5.9	事故释放开始后各网格点居民自第 $l$ 小时起撤离 7 天的可避免剂量 .....	( 86 )
5.10	事故释放后第 $l$ 小时服碘片的情况下甲状腺可避免剂量与剩余剂量 .....	( 87 )
5.11	健康效应评估 .....	( 88 )
5.12	经济代价评估 .....	( 88 )
5.13	参考文献 .....	( 90 )
<b>第 6 章</b>	<b>核应急贝叶斯决策模型 .....</b>	<b>( 91 )</b>
6.1	引言 .....	( 91 )
6.2	核事故应急中的贝叶斯决策模型 (NBDM) .....	( 91 )
6.3	计算机实现 .....	( 105 )
6.4	核事故应急贝叶斯风险决策实例分析 .....	( 109 )
6.5	小结 .....	( 110 )
6.6	参考文献 .....	( 110 )
<b>第 7 章</b>	<b>核应急多目标决策模型 .....</b>	<b>( 112 )</b>
7.1	多属性效用排序决策概述 .....	( 112 )
7.2	多属性效用排序理论 .....	( 113 )
7.3	多属性效用排序实施方案 .....	( 115 )
7.4	参考文献 .....	( 125 )
<b>第 8 章</b>	<b>核应急决策模型 .....</b>	<b>( 126 )</b>
8.1	概述 .....	( 126 )
8.2	核应急模糊决策理论 .....	( 126 )
8.3	核应急模糊决策的实施方案 .....	( 128 )
8.4	NAEDSS 模糊决策排序实例 .....	( 135 )
8.5	参考文献 .....	( 136 )
<b>第 9 章</b>	<b>控制操作子系统 COSY 的总体设计 .....</b>	<b>( 137 )</b>
9.1	COSY 的总体框架 .....	( 137 )
9.2	COSY 的信息结构 .....	( 155 )
9.3	COSY 的计算机实现思想 .....	( 172 )
9.4	参考文献 .....	( 182 )

# 第1章 概 论

## 1.1 核应急决策支持系统总体结构概述

### 1.1.1 核应急决策支持系统的框架结构

核事故应急决策支持系统（Nuclear Accident Emergency Decision Support System）简称 NAEDSS 系统，它由四个子系统构成，分别是：控制操作子系统（Control Operation Subsystem 简称 COSY）；预测子系统（Prevision Subsystem 简称 PSY）；对策子系统（Countermeasure Subsystem 简称 CSY）；决策子系统（Decision Subsystem 简称 DSY）。加上数据库和通讯界面就组成了如图 1-1 所示的总体框架结构。

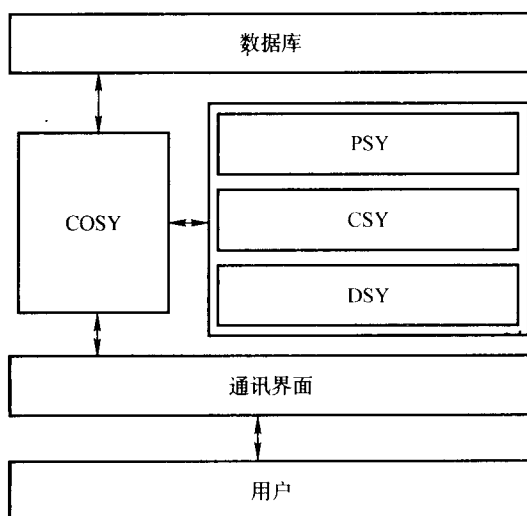


图 1-1 NAEDSS 总体框架结构

### 1.1.2 核应急决策支持系统的决策支持层次

按照系统结构定义，一旦发生核事故，地理信息系统——GIS（Geographic Information System）负责给决策者提供核电厂生产运行的基本数据，及周围环境的地理、人口等数据，作为第一层次（背景）的决策支持。

预测子系统（PSY）模块负责调出释放的源项，并按气象和环境条件等基本数据计算出烟羽走向、核素的空间浓度分布及相应的预计剂量场，并利用地理信息系统技术将计算结果分别显示在核电站周围各对应地区的地图上，即提供第二个层次的决策支持。

对策子系统（CSY）负责给出各种可能的应急对策并计算出核电站周围各网格点公众的可避免剂量等，即提供第三个层次的决策支持。

决策子系统（DSY）负责对所有应急对策方案进行优化排序，给出最优方案，即提供第四个层次的决策支持。

这些子系统都在 COSY 的控制之下运行，而且 COSY 还提供用户与系统的交互界面并且管理系统数据库。

### 1.1.3 核事故应急决策支持系统运行示意图

核事故应急决策支持系统运行示意图，如图 1-2 所示：

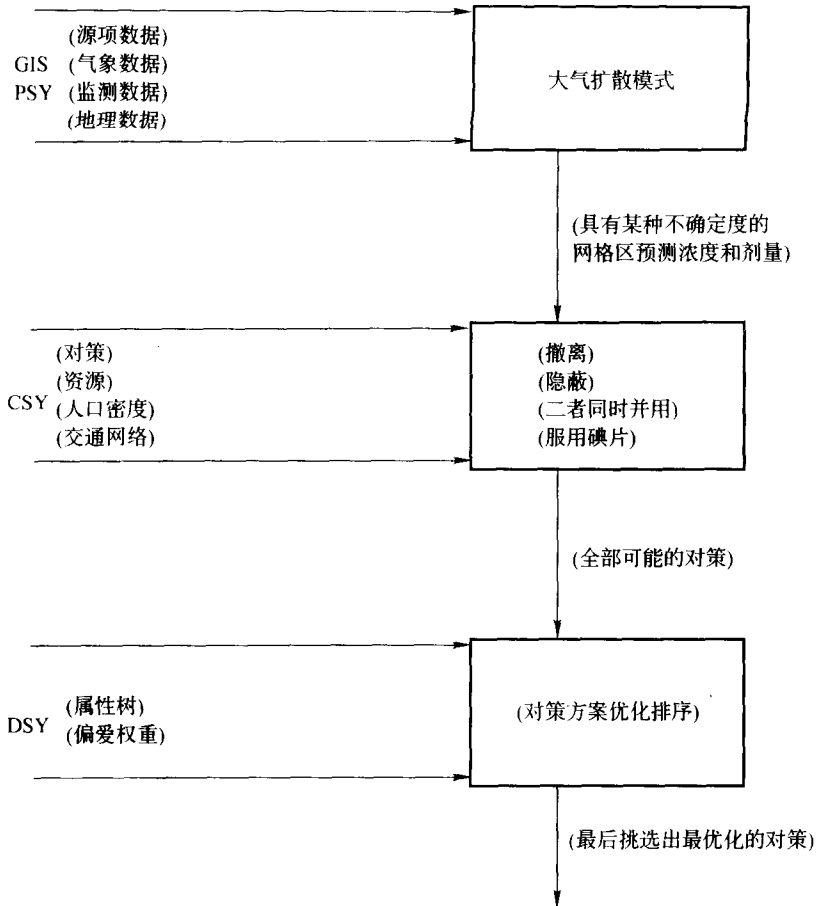


图 1-2 核事故应急决策支持系统运行示意图

## 1.2 各子系统的基本功能

### 1.2.1 操作系统 COSY

操作系统 COSY 是用于整个系统控制、数据管理及用户界面的操作系统，它包括通讯界面和数据库等。

#### 1.2.1.1 通讯界面

通讯界面用于 NAEDSS 系统与用户相互交换信息，用户界面有控制输入参数与执行模块的基本功能，即能定义模块参数，启动模块、暂停或终止模块。



通讯界面分为两部分：主对话窗口和应用程序初始化窗口。

主对话窗口：带有图标和菜单、并具有访问控制功能的窗口，用户可以有选择的打开这些窗口，以创建自己的工作环境。

应用程序初始化窗口：在应用程序初始化启动后，用户可以输入数据，创建一个层次化的结构，执行用户合适的输入控制。

### 1.2.1.2 数据库

在系统中，必须管理、处理和评价不同种类的大量数据，诸如地理、气象、辐射和经济数据库，信息，准则，统计，以及专家知识（事实，规则，优先权）。它们可以按其数据结构与格式存储在不同的数据库中。数据库包括下列四个子库：

#### (1) 程序数据库

程序数据库包含应用程序的参数和结果。该数据库，特别是它的结构与 NAEDSS 系统的各模块相连接。

#### (2) 基本数据库

基本数据库包含的数据与系统中现有的外部程序模块无关。特别是，它包含核电站的信息、物理常数和干预水平。

#### (3) 地理信息数据库

建造地理信息系统用以处理各种地理和统计信息，组织与其他环境数据库进行数据存取和相互交换。

#### (4) 实时数据库

实时数据库由各种环境监测数据和测量数据组成。所以，它必须连接到各种在线网络，按不同的数据格式得到环境数据（例如，辐射测量，气象预报）。

### 1.2.2 预测子系统 PSY

PSY 完成下列任务：

- (1) 根据与事故有关数据估算源项；
- (2) 根据气象测量数据，利用气象分析模型进行风场与湍流场估算；
- (3) 分析排放到大气中放射性核素在大气中的迁移和沉积，确定大气中及地面上放射性浓度随空间和时间的变化；
- (4) 根据大气中及地面上放射性浓度的测量数据与模型计算值进行比较，利用有关的数据同化技术和拟合技术进行必要的修正；
- (5) 分析放射性核素在环境（特别是在食物链）中的迁移；
- (6) 根据食物中放射性核素浓度的实测数据，用不断反馈的方式调整食物链的模型参数或修正地面污染分布情况；
- (7) 计算由各种辐射途径所造成的剂量和剂量率。

在 PSY 子系统中，包括下列程序模块：

- ① 分段高斯烟羽模型 ATSTEP；
- ② 拉格朗日烟团模型 RIMPUFF；
- ③ FDM 食物链模块，用于计算早期及晚期的照射途径，特别是食物链造成的剂量；
- ④ PAD 预处理计算模块；
- ⑤ HEALTH 模型，用于计算确定性及随机性的健康效应；

⑥ ECONOM 模型，用于计算经济后果。

### 1.2.3 对策子系统 CSY

对策子系统的任务是对防护行动和措施进行模拟。根据 PSY 子系统所提出的目前和未来放射状况和气象条件，连同环境和经济条件的有关参数，估算可供选择的防护行动所可能避免的个人/集体剂量，分析防护行动的代价（包括经济损失，健康效应，影响区域大小和人数，所需要的资源），从而定量估计各种防护行动（隐蔽、撤离、稳定碘片分发、去污、避迁、食物禁用）组合的优缺点，为应急决策过程提供必要的数据和信息。

在 CSY 中包括下列主要模块：

- ① 早期应急防护措施模块 ECM；EMERSIM；
- ② 晚期应急防护措施模块 LCM，包括陆地环境（LCMT）和水环境（LCMA）两个子模块。

早期应急防护措施模块 EMERSIM：

早期应急防护措施一般限于在距核电站几十公里的地区范围内，在时间上包括由释放开始前的几小时到放射性烟云经过后的几小时的时间里，在一个给定的事故情景下，可以由剂量干预水平和（或）应急计划区来确定应急行动的范围。

EMERSIM 的任务是确定需要采取早期应急行动的区域，模拟这些行动和计算在采取措施和不采取措施情况下的个人剂量。

EMERSIM 评估的主要输出结果是各时间和空间网格点上每种照射途径的辐射剂量和这些剂量的总和。计算不同照射途径的辐射剂量，其中包括烟羽吸入的剂量，烟羽的  $\gamma$  外照射，沉降到地面的物质产生的  $\gamma$  外照射，以及沉积在人们皮肤和衣服上的放射性核素产生的  $\gamma$  外照射。所选择的重要结果可以传送到图形系统中，以地图、图表等形式展示给用户。

### 1.2.4 决策子系统 DSY

决策子系统基本上是本工作独立开发的，DSY 子系统中主要模块有粗专家过滤，多属性效用排序，模糊因子量化与赋权，精细专家评价，贝叶斯风险推断与决策等。

#### 1.2.4.1 粗专家过滤系统 CES

CES (Coarse Expert System) 是对 CSY 输出的大量的可能性对策进行筛选过滤，它采用严格的逻辑判断与详细的约束条件对大量的可能性对策进行过滤筛选。粗专家过滤系统效率是很高的，这是因为输入的可能性对策量很大，例如对含有 17 个网格的应急计划区域，就意味着含有  $2^{17}$  个可能性对策<sup>[5]</sup>，也意味着上千万个可能性对策的输入，因此粗专家过滤器的筛选效率至少应达到万分之一，这意味着此专家系统过滤器应在几分钟内将对 1000 万个可能性对策中过滤出 1000 个可行的对策，再将这 1000 个可行对策提供给多属性效用排序模块去进一步处理。

#### 1.2.4.2 多属性效用排序与模糊因子量化

MAUT Ranking Module (Multiattribute Utilities Ranking Module) 它既是一种过滤器，又是一种排序器，作为过滤器的过滤效率应达到 99%，也就是说对 1000 个可行对策经过滤筛选后能得到 10 个优化的排序对策。

在多属性效用排序系统中含有两个模块，一个是 HERESY 模块，一个是 M-Crit 模块。

HERESY 模块的任务是采用简化了的线性属性函数作敏感性分析。对大量的可行性对策进行过滤，以减少对策的数量。一直可减少到最后 10 个可行对策。

M-Crit 模块是多属性判别模块，模块的任务是对各种属性因素如代价、健康效应、最大

受照个人剂量、个人避免剂量、集体避免剂量、公众心理和政治因素作量化处理与赋权，并给出优化排序对策。

#### 1.2.4.3 精细专家评价 FES 与贝叶斯风险决策

FES (Fine Expert System)，是为决策提供最满意的排序对策，对于每一种对策都给出了优缺点评价和详细的解释，作为决策者最终决策依据。

由于在 MAUT 排序过程中，对策与多属性因素，权重的相互作用，在这种作用下，无论强调了哪一种因素都会产生一套优化排序对策，所以最初由 MAUT 的排序对策不一定是最佳的，必须经过 FES 的精细审查，如果审查不合要求，可令 MAUT 模块按某种要求重新排序，重新排序的结果再进行审查。

FES 的另一种任务是按决策者的要求进行决策排列。使用贝叶斯决策的根本点则是计算各种决策的风险。在众多的，相互制约的多属性条件下，采用贝叶斯条件概率分析，按其损失函数，计算出风险。在按风险由小到大排序，挑选其风险最小的作为首选决策（或最终决策）。

#### 1.2.4.4 决策子系统的三种决策模型

本工作开发的 DSY 子系统中包括三种决策模型：多属性效用排序模型，Bayes 风险决策排序模型和模糊决策排序模型。这三种决策模型将在本书的第 6、第 7、第 8 章中作详细介绍。

(1) 多属性效用排序决策模型：在多属性效用排序决策模型中增加了模糊因子属性（如政治因素，公众心理因素）。为了做到多属性效用数学运算，还研究了各属性因子的无量纲化和归一化的处理方法，此外我们还做了各属性因子的权重处理。计算机实现了多属性效用排序决策支持。

(2) Bayes 风险决策排序模型：在系统中我们开发了核事故应急 Bayes 决策模型（NB-DM），在本模型中首先做 Bayes 推断和风场分布的动态修正，试图减少预报风场不确定性对决策适宜性的影响，还做了专家偏好和标准方案属性值的及时更新并给出了一个例题的决策风险计算。

(3) 模糊决策排序模型：模糊决策中我们开发了模糊因素的量化，在广泛征求专家意见的基础上做了模糊与非模糊因素权重归一化处理，开发了模糊决策系数的加权平均型数学运算模式，并给出了一个模糊决策的例题计算。

## 1.3 参考文献

- 1 Ahrhardt J., Shershakov V M. Real - time Decision Support System for OFF-site Emergency Management Following a Nuclear Accident; European Commission, Report EUR 16533, 1996
- 2 Ahlbrecht M et al. Decision Support Issues in RODOS; the Needs of Decision Makers. Radiation Protection Dosimetry, 1997, 73 (1 -4)
- 3 G. Caminada, et al. Uncertainty in RODOS RODOS(B)-RP(94)-05. 2000
- 4 Papamichail S French. (1997a) Screening Strategies in Nuclear Emergencies. RODOS (WGS)-TN(97)-01. School of Information, University of Manchester
- 5 S French. Multi - attribute Decision Support in the Event of a Nuclear Accident. J. Multi-criteria Decision analysis, 1996 (5): 39

# 第2章 核事故与核应急状态的分级

## 2.1 核事故的分级

国际原子能机构 IAEA 和经济合作与发展组织制订了国际核事故分级表，并建议世界各国正式使用它。制订这个分级表的目的是为了统一划分世界核电厂事故的级别，迅速向公众通报核电厂对安全有重要意义的事故。现在的分级表，可使专家对一个事故的分析集中用 8 个等级（0~7）中的一个级表示，7 级代表特大事故，0 级表示无核安全意义的事件。1~3 级称为事件，4~7 级称为事故。

### 2.1.1 核事故的分级原则

表 2-1 列出了事故分级的三个主要准则——场外影响、场内影响和纵深防御降级。

第一个准则适用于造成放射性场外释放的事故。该栏中最高的 7 级，相当于具有广泛健康和环境后果的特大事故即场外影响，如 1986 年的前苏联的 Chernobyl 核电站事故。该栏最低的 3 级，代表有很少量的放射性物质释放，使受照最大的公众成员受到相当于规定的公众年剂量限值的几分之一至十分之一的辐照剂量。这一剂量一般约为受天然本底辐射照射的年平均剂量的十分之一。

第二个准则考虑事件的场内影响，其范围从 5 级（通常代表核反应堆堆芯严重损坏的情况）降至 3 级（存在严重污染和（或）工作人员受到过量照射）。

第三个准则适用于涉及核电厂纵深防御降级的事故。这里纵深防御是指在所有核电厂的设计中都有的一系列安全系统，用以防止严重的场内和场外影响。从纵深防御考虑的事故范围从 3 级至 1 级。

表 2-1 核事故分级准则

级别/说明	准 则		
	场外影响	场内影响	纵深防御降级
7 特大事故	大量释放： 广泛的健康和环境影响		
6 严重事故	明显释放： 全面实施当地应急计划		
5 有场外危险的事故	有限释放： 部分实施当地应急计划	堆芯严重损坏	
4 主要在设施内的事故	少量释放： 公众受到规定限值量级 的照射	部分堆芯损坏 对工作人员有急性健康效应	

级别/说明	准 则		
	场外影响	场内影响	纵深防御降级
3 严重事件	极少量释放： 公众受到小部分规定限值的照射	严重污染 工作人员受过量照射	接近事故—— 丧失纵深防御措施
2 事件			具有潜在安全后果的事件
1 异常			偏离规定的功能范围
0 低于本表级别			安全上无重要意义

### 2.1.2 国际核事故分级实例

表 2-2 列出了国际核事故分级的典型实例。

表 2-2 国际核事故分级典型实例

级别	说明	准 则	实 例
7 级事故	特大事故	<ul style="list-style-type: none"> <li>堆芯核素总量大部分向外释放，一般涉及长、短寿命放射性裂变产物的混合物（从放射学上看，其量相当于 <math>10^{16}</math> Bq 以上的碘-131）</li> <li>可能有急性健康效应。在广大地区（可能涉及一个以上国家）有晚发健康效应。有长期的环境后果</li> </ul>	1986 年前苏联切尔诺贝事故
6 级事故	严重事故	<ul style="list-style-type: none"> <li>裂变产物向外释放（从放射学上看，其量相当于 <math>10^{15} \sim 10^{16}</math> Bq 碘-131）。为限制严重的健康效应很可能需要全面实施当地应急计划</li> </ul>	1957 年前苏联克什特姆后处理厂事故
5 级	有场外危险事故	<ul style="list-style-type: none"> <li>裂变产物向外释放（从放射学上看，其量相当于 <math>10^{14} \sim 10^{15}</math> Bq 碘-131）。在某些事故情况下，为减少健康效应的可能性，需要部分实施应急计划（如就地隐蔽和/或撤离）</li> <li>由于机械效应和/或熔化，大部分堆芯严重损坏</li> </ul>	1957 年英国温茨凯尔事故 1979 年美国三里岛事故
4 级	主要在设施内事故	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射性向外释放，使受照最大的场外人员受到几毫希量级的剂量。除当地食品控制可能需要防护行动外，一般不需要场外防护行动</li> <li>由于机械效应和/或熔化，反应堆堆芯受到某些损坏</li> <li>工作人员所受剂量可能导致急性死亡</li> </ul>	1980 年法国圣洛朗事故 1973 年英国温茨凯尔后处理厂事故 1980 年西班牙波诺斯艾尔临界装置事故

续表

级别	说明	准 则	实 例
3 级事件	严重事件	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 放射性向外释放超过规定限值，使受照最大的场外人员受到十分之几毫希量级的剂量。无需场外防护措施</li> <li>· 因设备故障或运行事件造成场内高辐射水平和/或污染。工作人员过量照射（个人剂量超过50毫希）</li> <li>· 安全系统的进一步故障可能导致事故工况的事件，或者某些初因事件发生，安全系统不能防止事故发生的状况</li> </ul>	1989年西班牙范德略斯事件
2 级	事件	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 虽不直接或立即影响核动力厂安全，但有可能导致随后重新评价安全措施的技术事件或异常现象</li> </ul>	
1 级	异常	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 没有风险，但表明缺乏安全措施的功能或运行异常。这可能是由于设备故障，人为误操作或程序不适当造成的异常。应与不超过运行限值或运行工况以及能按适当的程序恰当管理的状况相区别（后述情况一般是“低于本表级别”的工况）</li> </ul>	
低于本表级别 0 级	安全上无重要意义		

## 2.2 核应急状态分级

### 2.2.1 核应急的定义

核应急是由于核设施发生或即将发生事故，使核设施场内、外的某些区域已经或可能处于紧急状态，要求立即采取行动，以避免事故的发生或减轻事故的后果。

### 2.2.2 核应急状态按我国与国际原子能机构分级分为四级

(1) 应急待命。有关人员得到通知，进入准备应急的状态。

(2) 厂房应急（应急状态的影响只限于工厂的部分区域）。厂内的人员行动起来，并通知场区外的有关机构。

(3) 场区应急（应急状态的影响限于场区内）。场区内的人员行动起来，并通知场外的有关机构也可以行动起来。

(4) 场外应急（应急状态的影响已超出场区边界）。执行整个场内、场外的应急响应计划。

宣布应急状态等级的根据是预先确定的核电厂应急行动水平。这里所谓“应急行动水平”是指可以用来作为建立应急状态等级和开始执行相应的应急措施的阈值。它们可以是特定仪表读数或观测值，辐射剂量或剂量率；气载、水载和地表放射性物质的特定的污染水

平等。表 2-3 列出了核电厂不同应急等级下堆芯损坏和场外辐射状况的一般描述。

表 2-3 核应急状态按核电厂堆芯状况与辐射情况分级

应急等级	核电厂堆芯状态	辐射情况
应急待命	堆芯燃料没有损坏	放射性物质的释放不超过技术说明书中的规定（或每年的限值）
厂房应急	核电厂的安全水平出现实际的（或潜在的）明显下降	放射性物质的释放造成的场址边界外的剂量仅仅是干预水平很小的一部分
场区应急	保护公众的核电厂设施的功能明显失效	放射性物质的释放造成的场址边界外的剂量不超过干预水平
场外应急	堆芯已经发生或即将发生损坏	场外剂量实际或可能超过干预水平

### 2.2.3 按核事故发生的放射性释放量划分应急状态等级

表 2-4 列出了核应急状态不同级别的放射性释放量。

表 2-4 核电厂各应急状态的放射性释放量

核应急等级	放射性释放量/ (Bq)	
	按吸入内照射计的放射学相当的 <sup>131</sup> I	按浸没外照射计的放射学相当的 <sup>133</sup> Xe
应急待命	很少	很少
厂房应急	很少 $\sim 3.7 \times 10^{11}$	很少 $\sim 3.7 \times 10^{14}$
场区应急	$3.7 \times 10^{11} \sim 3.7 \times 10^{13}$	$3.7 \times 10^{14} \sim 3.7 \times 10^{16}$
场外应急	$> 3.7 \times 10^{13}$	$> 3.7 \times 10^{16}$

### 2.2.4 场外应急状态的初始条件

对核电厂每一应急状态进行初始评价，是核电厂营运单位的职责。在营运单位的应急计划中规定的发布各级应急状态的特定条件和规则应尽可能是定量的，以使各种情况都能被判断清楚。宣布场区应急的条件必须以场区边界的剂量率是否达到规定的限值为依据，宣布场外应急的条件以公众的照射量和预期的工厂状况为依据；这些场区边界剂量率、场外公众照射剂量率和工厂状况要尽可能以仪器读数和报警指示来规定。为了使核电厂的运行人员能比较快地在事故早期识别可能的应急及其等级，在营运单位的应急计划中应该包括各应急状态的初始条件。在美国核电厂应急计划的准则中提出的场外应急的初始条件实例有：

(1) 在场区边界和在实际气象条件下，电厂流出物监测器探测到的水平超过全身剂量 0.01 Sv/h 或甲状腺剂量 0.05 Sv/h，或者根据电厂其他参数计算结果超过这些剂量率。

(2) 裂变产物的三个屏障（元件包壳、一回路边界和安全壳）丧失了两个，第三个也可能丧失。

(3) 工厂受到攻击，非授权人员占据控制室或任何其他要害部门。

(4) 值班负责人判断可能导致在短时间内释放出大量放射性的其他情况，例如出现任何堆芯熔化情况或任何其他原因。

(5) 值班负责人判断核电厂系统发生了重大失控事故（如火灾，地震等）。

## 2.3 核事故分期

一般将核事故进程分为三个阶段：早期、中期和后期，其特点如下：

### 2.3.1 事故早期

事故早期为出现明显的放射性物质释放的先兆，其持续过程可能在0.5小时到几天。

早期的主要辐射危害来自放射性物质的吸入和放射性烟羽的外照射，而防护措施的决策主要根据对工厂运行工况数据的分析和对事故后果的预估。在该阶段，也可能获得环境监测的某些结果（例如外照射剂量率或烟羽中的气载核素浓度），但因受时间条件的限制，监测结果的数据有限，加上事故发展和气象条件的变化，可能使早期的监测结果不足以成为防护措施决策的主要依据。

### 2.3.2 事故中期

从开始释放放射性物质后的最初几个小时起，一直延伸到几天或几个星期的这段期间。一般来说，本阶段开始时，大部分释放已经发生，而且大量的放射性物质可能已沉积于地面。

中期的主要辐射危害来自地面沉积的外照射、污染的食物和水的摄入以及因地面放射性沉积物的再悬浮引起的吸入，而防护措施的决策将可能主要依据环境监测数据做出，因为在这一阶段已经获得有关沉积造成的外照射水平以及食物、水、空气污染水平的环境监测数据，沉积物中的放射性物质的组分也可能被确定。

### 2.3.3 事故后期

事故后期从事故中期后开始，可以延伸几周到几年，这取决于正常生活条件的恢复。因此，其时间范围主要与释放的性质与大小及受影响地区的特性和范围有关。事故后期常常也称之为恢复期，但更准确说，恢复期是事故后期在时间上的延伸。

在后期对公众产生的照射途径基本上与事故中期的情况相同，但若不采取食物控制措施，来自污染食物的辐射危害有可能扩大。本阶段有可能主要依据环境监测数据来决定是否解除某些强制性的防护措施，以及决定是否可以恢复到正常生活条件。

## 2.4 参考文献

- 1 国际原子能机构，经合组织核能机构。国际核事件分级表。国际原子能机构通报，1990，32（2）
- 2 UNSCEAR. Source, Effects and Risks of Ionizing Radiation; 1988 Report to the General Assembly, with Annexes. United Nations Publication, New York, 1988
- 3 核安全法规 HAF0701，安全导则，核动力厂营运单位的应急准备
- 4 国际核安全世界咨询组。安全丛书 No. 75 - INSAG - 3，核动力厂的基本安全原则
- 5 核安全法规 HAF1006，安全导则，研究堆应急计划和准备
- 6 IAEA. Safety Series No. 86, Techniques and Decision Making in the Assessment of offsite Consequences of an Accident in a Nuclear Facilities. Vienna: IAEA, 1986
- 7 IAEA. Safety Series No. 97, Principles and Techniques for Post-Accident Assessment and Recovery in a Contaminated Environment of a Nuclear Facility, Vienna: IAEA, 1989



## 第3章 规则库的研究与开发

### 3.1 干预规则库的开发

#### 3.1.1 干预的目的：

为避免严重的确定性效应的发生，将公众可能接受的剂量限制在严重的确定性效应的阈值以下和将随机效应的危险降低至可接受的水平。

对于一个决策支持系统来说，要想得出一套决策方案，需建立一套完备而良好的规则库，本工作在开发核事故应急决策支持系统的过程中，对于规则库主要考虑了以下几个方面的内容：

国家政策与实践；行业规定与知识；地理限制因素；公众心理影响等。

#### 3.1.2 核事故早期应急

主要考虑三种应急措施（撤离、隐蔽、服食碘片），以下是早期应急决策过程中用到的9条具体规则：

(1) 如果可能发生堆芯熔化的事故，则应急内区要预防性撤离。

(2) 如果有可能发生确定性效应，则一定要撤离。

(3) 对于同一行政村的人员要采取相同的措施（如果划成17个区：内区+16个方位烟羽应急区，16个方位的外区则按小区统一行动）。

(4) 与剂量场有关的规则：

① 预期全身有效剂量超过500 mSv，或（和）甲状腺剂量超过5000 mGy，则撤离；预期全身有效剂量小于50 mSv，或（和）甲状腺剂量小于500 mGy，则不采取撤离；预期全身有效剂量在50 mSv~500 mSv或（和）甲状腺剂量在500 mSv~5000 mGy之间时，是否采取撤离措施应该进行优化；

② 预期全身有效剂量超过5 mSv，但没有采取撤离措施时必须隐蔽；预期全身有效剂量低于5 mSv，则不必采取隐蔽措施；预期全身有效剂量在5 mSv~50 mSv之间时，是否采取隐蔽要进行优化；

③ 甲状腺的预期剂量超过500 mSv，则需要服用稳定碘；甲状腺的预期剂量低于50 mSv，则不必服用稳定碘；甲状腺的预期剂量在50 mSv~500 mSv之间时，要进行优化。

(5) 在所有采取撤离措施以前，都要判断当时的条件是否能够撤离，比如说是否有堵车、暴风雨、洪水、断桥等情况发生而使撤离措施不能够执行。

(6) 方位规则

① 若风向不变，距离 $r_1 > r_2$ ，则若撤离 $r_1$ 区，就必须撤离 $r_2$ 区；

② 若风向不断变化，24小时内变化360°时，则全方位撤离，撤离距离各方位不同，与该方位的污染因子（风频/风速）成正比。

