

核事故后果评价方法 及其新发展

王醒宇 康 凌 等编著

原子能出版社

核事故后果评价方法 及其新发展

王醒宇 康 凌 编著
蔡旭晖 曲静原

原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

核事故后果评价方法及其新发展/王醒宇等编著.

北京:原子能出版社,2003.11

ISBN 7-5022-3021-1

I. 核… II. 王… III. 核电厂-事故-评价 IV. TM623

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 096749 号

内 容 简 介

本书介绍了核电厂事故情况下用于评价场外辐射后果的方法、模式参数和软件。内容包括源项估计、风场诊断和预报、大气弥散计算、剂量计算和评价后果的处理与分析等。

本书可供核应急专业人员和后果评价软件开发人员参考。

核事故后果评价方法及其新发展

出版发行	原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100037)		
责任编辑	徐向超		
责任校对	徐淑惠		
责任印制	丁怀兰 刘芳燕		
印 刷	保定市印刷厂		
经 销	全国新华书店		
开 本	850 mm×1168 mm 1/32		
字 数	225 千字		
印 张	8.75		
版 次	2003 年 11 月第 1 版	2003 年 11 月第 1 次印刷	
书 号	ISBN 7-5022-3021-1		
印 数	1—500	定 价	26.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

近十几年来,我国参照一些国际组织提出的有关辐射防护基础方面的概念、原则和方法制定了自己的核安全法规与有关标准、条例等规章(也有一些内容是等效采用的),基本上做到了与国际接轨;在此期间,随着我国核电事业稳步发展,核应急领域的一些部门和单位组织进行了核事故后果评价软件系统的研究、开发或引进,吸取和应用了国际国内一些新的方法与技术,使得有关事故后果评价方法研究及其应用领域出现了不断发展、较为活跃的局面。从目前已有信息来看,以后的几年这种发展还将持续不断。

鉴于作者的专业知识范围和应用经验,本书将着重介绍以下几个方面的理论基础及其应用情况,这些方面也处于后果评价领域的发展前沿。

- (1)干预原则的应用与可防止剂量的计算方法;
- (2)实时风场预报的实现方法;
- (3)地理信息系统的实际应用;
- (4)网络技术在核应急领域应用的初步探索;
- (5)基于工况的事故源项估计方法的研究。

考虑到后果评价方法的完整性,在编写过程中兼顾了基本理论、功能实现和应用技术三个方面的内容。本书共分9章。

第1章绪论,介绍后果评价方法的目的、手段、地位等内容,同时讨论了我国核应急组织在后果评价方面的任务、分工以及目前的软件开发状况;

第2章后果评价方法的辐射防护基础,介绍相关概念和干预基本原则以及剂量学基础;

第3章源项,着重介绍根据核电厂工况确定严重事故源项的

方法；

第4章风场模式，介绍风场诊断模式和实时预报模式的原理以及相关的气象学基本概念、参量和方法，描述了风场预报模式的实际使用情况；

第5章扩散模式，介绍烟团结合随机游走的扩散模式原理以及相关的基本概念、参量和方法；

第6章剂量模式，描述了应急防护行动的特点，防护行动的模拟方法以及剂量计算方法；

第7章后果评价方法的应用，以开发完成的两个后果评价软件系统为例，介绍了软件系统相关的结构、软件平台、输入输出控制、地图的数字化、空间关联查询以及网络应用等内容；

第8章核应急决策支持系统 RODOS 简介，简要地介绍了 RODOS 系统的概况和新进展；

第9章后果评价方法发展展望，介绍了目前国内的后果评价方法和软件的技术状态，并从功能与特点上与 RODOS 系统做了比较，讨论了未来的发展方向。

本书编写人员有王醒宇、康凌、蔡旭晖和曲静原。各章分工为：第1,2,3,6,7,9章：王醒宇；第4章：康凌；第5章：蔡旭晖、康凌；第8章：曲静原。最终本书由王醒宇统稿定稿。

本书的完成，得到了许多老师和同行的关怀和支持。施仲齐研究员和陈家宜教授为本书提出了许多有益的建议和修改意见；凌永生和郑启燕也参加了部分工作，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平和时间所限，书中错误在所难免，欢迎读者批评指正。

作 者

2003 年 11 月

于北京

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 后果评价方法概述	3
1.2.1 后果评价的目的	3
1.2.2 后果评价的手段	4
1.2.3 后果评价的地位	5
1.2.4 后果评价方法涉及的相关学科领域	6
1.2.5 后果评价的不确定性	6
1.3 我国核应急组织的基本职能及其在后果评价方面的任务	8
1.3.1 核应急组织的基本职能	8
1.3.2 核应急组织在核事故后果评价方面的任务	8
1.4 我国核事故后果评价软件的开发	10
1.4.1 发展过程及软件技术水平划分	10
1.4.2 总体技术路线及分类	11
1.4.3 开发状况	12
参考文献	14
第 2 章 后果评价方法的辐射防护基础	16
2.1 相关基本概念	16
2.1.1 辐射、照射和剂量	16
2.1.2 应急、应急状态和应急计划区	20
2.2 辐射防护概念体系	21
2.2.1 辐射防护概念体系的发展	21

2.2.2	实践与干预	22
2.2.3	干预原则	22
2.2.4	干预原则的运用与干预水平	23
2.2.5	通用干预水平和行动水平	25
2.3	剂量学基础	27
2.3.1	传能线密度 LET	27
2.3.2	相对生物效能 RBE	28
2.3.3	剂量当量	28
2.3.4	当量剂量和辐射权重因子	29
2.3.5	组织权重因子和有效剂量	29
2.3.6	体模	30
2.3.7	ICRP 呼吸道模型	31
2.3.8	ICRP 内照射 DF 出版物	32
2.3.9	美国联邦导则报告	33
	参考文献	45
第3章	源项	47
3.1	源项及其确定方法	47
3.1.1	源项	47
3.1.2	放射性核素来源	48
3.1.3	源项组分	51
3.1.4	估计源项的基本方法	52
3.2	基于工况的源项估计	54
3.2.1	基本步骤	54
3.2.2	根据核电厂工况确定源项的原理	55
3.2.3	估计堆芯裂变产物的总量	56
3.2.4	估计从堆芯释放的裂变产物数量	56
3.2.4.1	堆芯状况	56
3.2.4.2	堆芯释放份额	57
3.2.4.3	堆芯损坏评价方法	61

3.2.5	裂变产物从堆芯向大气环境的释放	64
3.2.6	基于工况的场外后果快速评价	68
	参考文献	70
第4章	风场模式	72
4.1	概述	72
4.1.1	气象要素简介	72
4.1.1.1	风	72
4.1.1.2	气温(T)与位温(θ)	73
4.1.1.3	气压	74
4.1.1.4	太阳辐射	74
4.1.1.5	云	75
4.1.1.6	下垫面	75
4.1.1.7	大气稳定度	75
4.1.1.8	科氏力	78
4.1.1.9	大气湍流	82
4.1.1.10	大气边界层	83
4.1.1.11	粗糙度 z_0	87
4.1.1.12	地转风	88
4.1.1.13	湍流扩散参数	91
4.1.2	风场模式简介	95
4.1.3	模式的数值解法	97
4.2	风场诊断模式	103
4.2.1	风场诊断模式原理	103
4.2.2	地形随动坐标系下的风场诊断模式	105
4.2.3	应用实例	106
4.3	风场预报模式	112
4.3.1	模式方程组	112
4.3.2	地形随动坐标系下的模式方程组	113
4.3.3	模式的边界条件	114

4.3.3.1	模式底部的边界条件	114
4.3.3.2	模式顶部的边界条件	115
4.3.3.3	模式的侧边界条件	115
4.3.4	应用实例	115
4.3.4.1	某些气象要素参数化的处理方法	115
4.3.4.2	某些气象要素的预报方法	118
4.3.4.3	风场资料同化的处理方法	119
4.3.4.4	数值算法	120
4.3.4.5	小尺度风场的预报方法新探	128
4.3.5	风场预报模式的检验	129
4.3.5.1	数值试验方案	129
4.3.5.2	对比结果和分析	130
4.3.5.3	结论	136
参考文献		141
第5章	扩散模式	143
5.1	描述污染物扩散的两种方法	143
5.1.1	欧拉法	143
5.1.2	拉格朗日法	144
5.1.2.1	泰勒(Taylor)公式	145
5.1.2.2	随机游走模式	150
5.2	高斯模式的应用与分析	153
5.2.1	高斯模式的基本原理	153
5.2.2	湍流扩散参数 σ_y 和 σ_z 的确定	155
5.2.3	抬升高度	156
5.2.4	地面浓度与最大地面浓度	159
5.2.5	高斯模式的适用范围	161
5.3	随机游走粒子-烟团模式	161
5.3.1	模式的基本原理	161
5.3.1.1	平均风场资料	162

5.3.1.2	湍流场参数确定	162
5.3.1.3	粒子-烟团模式的耦合	164
5.3.1.4	排放初始过程处理	165
5.3.1.5	边界层时间变化对扩散的影响	166
5.3.1.6	干湿沉积作用的处理	167
5.3.1.7	多核素扩散处理	168
5.3.2	模式数学处理	168
5.3.2.1	模式方程的离散化	168
5.3.2.2	粒子-烟团的边界处理	169
5.3.2.3	计算结果的拟合函数表达	169
5.3.3	基本性能测试	169
5.3.3.1	粒子-烟团耦合方法测试	170
5.3.3.2	边界层高度的时间变化处理	173
5.3.4	模式应用实例	174
5.3.5	结论	180
参考文献		181
第6章 剂量模式		182
6.1	剂量模式概述	182
6.1.1	剂量模式解决的问题	182
6.1.2	事故阶段的划分	183
6.1.3	照射途径与防护行动	183
6.1.4	防护行动及其模拟方法	184
6.1.5	用于模拟的主要参数	187
6.2	应急阶段防护行动评价	188
6.2.1	假定条件	188
6.2.2	描述应急阶段防护行动的参量	189
6.2.3	照射途径和剂量方程	190
6.2.4	应急阶段的时段划分	190
6.2.5	防护行动方案的实例	191

6.2.6	远距离烟云外照射剂量	192
6.2.7	地面照射剂量	194
6.2.8	烟云吸入内照射剂量	195
6.2.9	服用稳定碘后的放射性碘的吸入剂量	196
6.2.10	近距离烟云外照射剂量	197
6.2.11	撤离过程中的剂量	200
6.2.12	应急阶段剂量累积	202
6.3	应急阶段行动建议	204
6.3.1	假定条件	204
6.3.2	两天内的预计吸收剂量	204
6.3.3	隐蔽的可防止剂量	206
6.3.4	撤离的可防止剂量	207
6.3.5	服用稳定碘的可防止剂量	208
6.4	中长期阶段防护行动评价	208
6.4.1	假定条件	209
6.4.2	地面照射剂量	210
6.4.3	再悬浮吸入内照射剂量	211
6.4.4	剂量累积	212
6.5	中长期阶段行动建议	213
6.5.1	未去污时避迁的可防止剂量	213
6.5.2	去污后的避迁可防止剂量	214
	参考文献	215
第7章	后果评价方法的应用	217
7.1	后果评价软件系统	217
7.2	系统结构及软件平台	218
7.2.1	系统结构及硬件连接	218
7.2.2	系统软件平台	219
7.3	用户操作台	220
7.3.1	用户操作台基本功能	220

7.3.2	技术要求	221
7.3.3	输入控制	221
7.4	地图数字化和地理信息数据库	223
7.4.1	地图数字化	223
7.4.2	地图数据类型	224
7.4.3	地理信息数据库	225
7.5	评价程序基本功能	227
7.5.1	风场和大气扩散程序	227
7.5.2	剂量程序	227
7.6	结果输出和数据处理	227
7.6.1	评价结果绘图	227
7.6.2	空间关联查询	229
7.6.3	常用图表的编辑和输出	230
7.7	网络应用	230
	参考文献	232
第8章	核应急决策支持系统 RODOS	233
8.1	背景与目标	233
8.2	系统结构框架	236
8.3	项目的组织	237
8.4	STEPS 系统	239
8.4.1	概述	239
8.4.2	系统功能	239
8.5	应急防护措施的决策分析	240
8.6	不确定性分析与数据同化	243
8.6.1	放射性释放源项	243
8.6.2	大气扩散计算	245
8.6.3	其他方面	246
8.7	RODOS 4.0	247
8.7.1	RODOS PV 4.0	247

8.7.2	RODOS PRTY 4.0	250
8.7.3	独立软件程序	252
8.8	RODOS 的安装运行	252
8.9	未来发展	253
8.10	RODOS 在我国的引进与开发应用	254
	参考文献	258
第 9 章	后果评价方法发展展望	259
9.1	国内技术现状	259
9.2	我国后果评价领域展望	262
	参考文献	266

第 1 章 绪 论

1.1 背景

我国核工业始于 1955 年,20 世纪 50 年代后期至 70 年代,核工业主要是为国防服务。在此期间建立了相应的科研、设计、建造、教育和核燃料循环工业体系,为核工业日后的发展奠定了基础。1978 年我国开始实行改革开放政策,核工业转向重点为经济建设和人民生活服务。20 世纪 80 年代初,国务院决定建造秦山核电厂和广东大亚湾核电站,我国开始发展核电工业。1991 年 12 月 15 日,我国自行设计、建造的秦山核电厂并网发电;1993 年 8 月 31 日大亚湾核电站 1 号机组并网发电,1994 年 2 月 7 日 2 号机组并网发电。秦山核电厂和广东大亚湾核电站已投入运行多年,总装机容量 2 100 MW(电功率),2000 年核发电量占我国当年总发电量的 1%左右。1996 年以来,陆续开工建设 4 座核电厂,共 8 台机组,总装机容量约 6 600 MW(电功率),将在 2005 年前建成。届时,核电装机容量将占我国电力总装机容量的 2.5%左右,目前我国运行及在建核电厂清单见表 1.1^[1]。

我国核电建设的总方针是“安全第一,质量第一”,已经发布和实施了一套核安全法规对核电厂的选址、设计与建造、调试、运行和退役等阶段进行管理。然而,即使采取了种种措施只能降低事故发生的概率和事故后果危害的大小,而不能完全排除事故的发生。因此,对于核安全总目标“在核设施中建立和保持防止辐射危害的有效防护,以保护个人、社会和环境免受损害”^[2]来说,制定应急响应计划并在一旦发生事故时及时采取行动减缓事故后果,是

实现这一总目标所必不可少的措施。

表 1.1 我国运行及在建核电厂清单(截至 2003 年 6 月 15 日)

核电厂名称	机组号	所在地	堆型	额定电功率(MW)	开工日期	首次并网日期*
秦山核电厂	CN-1	浙江省海盐县	压水堆	300	1985-03-21	1991-12-15
广东大亚湾核电站	CN-2	广东省深圳市	压水堆	984	1987-08-07	1993-08-31
	CN-3	广东省深圳市	压水堆	984	1988-04-07	1994-02-07
秦山第二核电厂	CN-4	浙江省海盐县	压水堆	600	1996-06-02	2002-02-06
	CN-5	浙江省海盐县	压水堆	600	1997-04-01	(2002-12-01)
广东岭澳核电站	CN-6	广东省深圳市	压水堆	984	1997-05-15	2002-02-26
	CN-7	广东省深圳市	压水堆	984	1997-11-28	2002-09-14
秦山第三核电厂	CN-8	浙江省海盐县	重水堆	700	1998-06-08	2002-11-19
	CN-9	浙江省海盐县	重水堆	700	1998-09-25	2003-06-12
江苏田湾核电站	CN-10	江苏省连云港市	压水堆	1000	1999-10-20	(2004-05-15)
	CN-11	江苏省连云港市	压水堆	1000	2000-10-20	(2005-05-15)

* 表中带括号的日期是计划或原计划并网发电日期。

随着我国核电机组的增加,各级政府部门和核电厂业主已经或正在按照核安全法规的要求,建立或更新了后果评价软件系统以用于万一发生核事故情况下的应急响应。这也为我国核事故后果评价方法的发展提供了契机。

近十几年来,国际上的一些发展也十分值得注意。国际原子能机构(IAEA)和国际放射防护委员会(ICRP)等国际组织在其各种出版物中提供了一些有关核事故应急和干预方面的原则与技术方法,我国也陆续等效采用了其中一些主要出版物作为国家标准或部门规章。许多欧共体国家因切尔诺贝利核电站事故的促进而在辐射防护和应急准备方面进行了很多的改进,基于对此次事故后果的监测而进行了大量的研究,具备了对此次事故进行更准确

评价的能力。经济合作与发展组织核能机构(NEA/OECD)发表了一些报告介绍关于切尔诺贝利事故后果评价的新进展,对于进一步了解此次事故造成的后果和总结出具体而实际的后果评价方法都提供了很有益的帮助^[3]。由于欧洲国家地理上的特征和社会经济活动的紧密关系,欧共体于1990年启动了欧洲核应急决策支持系统(RODOS: Real-time and On-line Decision Support System)的研究开发项目,该项目涉及面广、历经时间长,目前已经基本达到了实用阶段。美国自20世纪80年代末开始发展的有关基于核电厂工况来确定事故源项的方法已经进入应用阶段,同时IAEA以技术报告的形式对此方法进行了推广。

本书力求结合我国的实际应用情况,反映近年来有关核事故后果评价方法的进展。

1.2 后果评价方法概述

1.2.1 后果评价的目的

“评价活动”定义为在事故期间或事故以后,为决定实施具体的应急措施而必须获得和处理信息所采取的活动。事故后果评价一般包括事故的环境监测,事故后果的模拟计算(即后果预测),以及对监测结果、计算结果进行分析和评价(如与干预水平或操作干预水平相比较)^[4]。

在核设施安全分析、环境影响分析、选址中的剂量评价、概率风险评价和应急计划、应急演习与应急响应中,都应用“事故后果评价”。尽管所采用的基本方法在很多情况下是大体相同的,例如所有这些应用中都包括对源项、大气弥散和剂量的估算三个基本步骤;大气弥散大多采用高斯烟云模式或修正的高斯烟云模式等,但由于目的和要求不同,它们之间的差别可能是很大的。如果不注意这种差别,可能会导致错误的结果或结论,在应急响应中可能

会做出错误的决策。

本书介绍在应急响应中的事故后果评价方法。事故后果评价在应急响应中十分重要,它要为采取应急防护行动的决策提供技术依据。具体地讲,事故后果评价的主要目的是:

- (1)了解已经发生的事故类别和事故规模;
- (2)计算、预测或估计事故的后果;
- (3)使决策成为可能。

在核应急时,必须对实施旨在减少居民辐射后果的防护行动还是取消这些措施做出决策。这些干预都是根据国家的计划或建议而做出的,计划和建议通常与国际组织制定的原则一致。在应急响应中,应当有一定的灵活性,以便能够反映所遇到的实际情况;这使得时间紧、心理压力大的决策过程复杂化了。因此,核应急情况下的一个最重要的问题是对所有这些不同类型的场外后果进行量化。

1.2.2 后果评价的手段

在大量的导则、技术报告和科学论文中阐述了各种各样的后果评价具体方法。这些方法繁简程度不一,包括了从使用计算器并结合公式和图表的手工评价方式,到使用计算机的复杂方式。

在核事故导致放射性物质释放的情况下,必须尽快并准确地对事故状况及其发展做出判断,从而进一步采取优化的防护行动方案。而事故的复杂迅变决定了开发和使用计算机辅助决策系统成为实现快速而准确响应的一种现实手段。自20世纪80年代后期,随着计算机技术日新月异的发展,国际原子能机构(IAEA)在其发表的86号安全丛书^[6]中就提出并分析了有关将计算机技术应用于核事故场外后果评价的可能性、应用技术及通用特点。近年来,计算机技术取得了突飞猛进的发展,这为核事故后果评价方法的更新与发展打下了良好的基础,使得“实时”评价已经可以实现,结果更加直观,内容更加丰富,传输速度更加快捷。