

公共卫生安全与应急处置系列

核(放射)突发事件应急处置

主编 顾乃谷 吴锦海

復旦大學 出版社

目 录

1 国外主要核(放射)突发事件与教训	1
第一节 前苏联切尔诺贝利核突发事件与教训	1
一、概况	1
二、核突发事件发生经过	3
三、核突发事件后的应急抢救	5
四、放射性扩散与对公众健康的影响	7
五、核突发事件原因与教训	8
第二节 美国三里岛核突发事件与教训	11
一、概况	11
二、核突发事件发生经过	12
三、核突发事件后的应急抢救	13
四、对环境和公众健康的影响	14
五、核突发事件原因与教训	15
第三节 日本东海村核燃料加工厂突发事件	15
一、概况	15
二、核突发事件后的应急救援	16
三、核突发事件原因与教训	18
2 核(放射)突发事件的类型和基本特点	20
第一节 核(放射)突发事件的类型	20
一、核突发事件	21
二、放射突发事件	22
三、核恐怖事件	26
第二节 核(放射)突发事件的基本特点	28
一、时间、地点的不确定性	28
二、危害程度的差异性	29
三、发展的快速性和阶段性	30
四、放射源类型和照射途径的多样性以及对人体辐射损伤的	

	复杂性	31
	五、放射性污染对环境的影响	35
	六、辐射的社会心理效应	35
	七、应急处理的专业技术性强、投入力量大和持续时间长	37
3	突发公共卫生事件应急处理法律制度	39
	一、《条例》的调整范围	39
	二、应急处理的基本原则	40
	三、应急处理组织指挥体系	40
	四、突发事件应急准备	42
	五、应急事件报告与信息发布	44
	六、突发事件应急处理	46
	七、法律责任	48
4	核(放射)突发事件的分级、分期和照射途径	50
	第一节 核(放射)突发事件分级	50
	一、核突发事件分级	50
	二、放射突发事件分级	55
	第二节 核突发事件的分期与照射途径	56
	一、早期	56
	二、中期	56
	三、晚期	57
	四、照射途径	57
5	核(放射)突发事件的医学应急准备和响应	60
	第一节 应急准备	61
	一、医学应急组织体系的建设	61
	二、医学应急通讯网络保障和信息系统建设	64
	三、医学应急响应预案制定	65
	四、医学应急支援力量,相关技术和物质的储备	71
	五、人员培训和公众宣传教育	72
	第二节 应急响应	73
	一、核突发事件医学应急状态分级	74
	二、医学应急组织的应急响应	74
	三、医疗救治应急响应	75
	四、辐射防护应急响应	76
	五、医学应急通讯响应行动	76

六、现场调查与处置	77
6 核(放射)突发事件的医学应急管理和分级救治	81
第一节 医学应急管理	81
一、医学应急管理的方针和政策	81
二、医学应急管理组织机构和职责	81
三、核(放射)突发事件的报告与监督管理	83
第二节 核与放射突发事件的分级医疗救治	87
一、一级医疗救治(现场救护)	87
二、二级医疗救治(当地救治)	87
三、三级医疗救治(专科救治)	91
第三节 公众的医学应急保障	91
7 核突发事件的人员防护与应对措施	93
第一节 公众防护的应急干预原则和干预水平	93
一、概述	93
二、在干预计划中应制定的干预水平	94
三、影响干预水平选择的因素	95
四、与干预水平比较用的剂量	96
五、制定干预水平中的一些实际问题	98
六、制定通用干预水平的方法	99
第二节 公众应急防护的应对措施	100
一、紧急防护措施	100
二、长期防护行动	104
第三节 救援及工作人员的防护	107
一、拯救生命与防止严重后果	107
二、短期恢复活动与可影响到公众的紧急对策	108
三、较长期的恢复活动	109
四、与核突发事件无直接相关的工作	109
8 贫铀武器的危害影响	111
第一节 贫铀及其特性	112
一、贫铀	112
二、贫铀特性	113
第二节 贫铀武器的制造和使用	115
一、贫铀武器的制造	115
二、贫铀武器的使用	117

第三节	贫铀对环境的影响	118
第四节	贫铀对人体健康的影响	121
第五节	贫铀弹不等于原子弹	125
一、	原子弹	126
二、	核爆炸的后果	128
三、	贫铀弹与原子弹的区别	129
9	核恐怖突发事件医学应急处理	131
第一节	核恐怖突发事件的危害	131
一、	急性放射病	131
二、	皮肤放射损伤	133
三、	放射复合伤	134
四、	内照射放射损伤	135
五、	心理效应	135
第二节	核恐怖突发事件医学应急处理	136
一、	急性放射损伤的医学应急处理	136
二、	放射性污染伤口的医学处理	138
三、	放射性体表皮肤污染的医学处理	138
第三节	常见放射性核素体内污染的医学处理	139
一、	碘-131	140
二、	铯-90	140
三、	铀-238/235	141
四、	钚-238/239	141
五、	铯-137	141
10	核(放射)突发事件辐射监测	143
第一节	辐射监测工作基本设想	143
一、	监测对象	143
二、	监测项目	144
第二节	场外环境辐射监测	145
一、	早期应急监测	145
二、	中后期应急监测	147
第三节	应急工作人员的监测	149
一、	γ 线外照射剂量监测	149
二、	甲状腺监测	149
三、	皮肤和衣服污染监测	150

四、事故后监测	150
五、生物剂量测量	151
六、体内污染监测	151
第四节 核(放射)突发事件辐射监测	153
一、工作场所监测	153
二、个人剂量监测	153
三、个人体内照射监测	154
11 核突发事件应急状态终止和环境恢复	156
第一节 应急状态的终止	156
一、应急状态终止的条件	156
二、应急终止的程序	156
三、突发事件后果的评价	157
四、影响事故后果的因素与干预	157
第二节 核突发事件后期的环境恢复	158
一、区域环境去污	159
二、放射性废物运输	160
三、环境恢复后管理	160
四、丢失放射性物质的处理	161
附录 1 常用术语	162
附录 2 国内外主要核(放射)事故选编	169
附录 3 活度和剂量单位换算	174
附录 4 用于构成十进制倍数和分数单位的词头	175

主 编 顾 乃 谷 吴 锦 海

编 者 （以姓氏笔画为序）

王伟华	复旦大学放射医学研究所
王洪复	复旦大学放射医学研究所
朱国英	复旦大学放射医学研究所
刘伟琪	复旦大学放射医学研究所
孙达人	复旦大学放射医学研究所
吴锦海	复旦大学放射医学研究所
何昌龄	卫生部卫生法制与监督司
陈红红	复旦大学放射医学研究所
胡建达	中国科学院上海原子核研究所
顾乃谷	复旦大学放射医学研究所
黄卫琴	复旦大学放射医学研究所

丛书总主编

姜庆五 俞顺章 金锡鹏

丛书编委 (按姓氏笔画排列)

陈秉衡 欧阳凤秀 季建林 金泰虞 金培刚

周志俊 屈卫东 赵琦 (兼学术秘书) 赵根明

夏昭林 顾乃谷 徐飏

前 言

随着我国核能的迅速发展和核技术在工农业生产和医学领域的广泛应用，它对促进国民经济的发展已发挥着极其重要的作用。实践证明核能是一种安全、可靠、清洁、经济的替代能源，然而核能毕竟不同于其他能源，尚存在有一定潜在的危险性。核技术给人类带来巨大利益的同时，也会因某些人为和技术上的因素，而发生危及生命与财产的各类放射突发事件。因而从核技术和平利用的一开始，世界各国就一直把核安全与放射防护问题置于首位。

近年来，国外已相继发生了数起重大核突发事件，尤其是 1986 年 4 月在前苏联发生的切尔诺贝利核突发事件，引起了国际上的极大关注。国际原子能机构（IAEA）等组织与各相关国家就如何防止核突发事件的发生，以及一旦发生核突发事件时应如何快速、积极、正确地启动医学应急救援预案，有效地抢救伤员，提高应急处理水平，保护广大公众的健康与安全，尽可能减轻核突发事件后果影响等问题开展了广泛研究与探讨。近 10 年来，我国平均每年发生各类放射突发事件约 30 起，与发达国家相比，我国放射突发事件的发生率相对较高。因此，必须迅速提高我国放射防护与医学应急救援的处置水平，才能适应核技术飞速发展的需要，也应坚持以预防为主，常备不懈的工作原则。

核（放射）突发事件的医学应急救援是突发事件应急处置工作的重要组成部分，也是一项技术性强、涉及面广、社会影响大的系统工程，并需要多部门、多专业的人员共同参与。为使有关人员能对核（放射）或核恐怖突发事件的特点、类型、危害及防护措施，对辐射损伤的医学急救处理有一个正确、科学的认识，本书将全面系统地介绍有关国内外核（放射）突发事件的基本类型与特点，严重程度的分级与事故过程分期，医学应急的准备与响应，医学应急的分级救治与管理，人员与公众的防护措施，伤员的应急处理，辐射监测，事故后期应急状态的终止和环境恢复以及应急处置的法律制度等知识内容。

本书由 11 位长期从事放射医学、放射卫生、剂量防护和卫生监督管理等工作的专家参加编写，鉴于核（放射）突发事件医学应急救援工作尚在不断发展与完善之中，本书编者虽做了很大努力，但因时间短促，缺点与不足在所难免，敬请

读者斧正。

本书在编写过程中得到了卫生部卫生法制与监督司、卫生部核事故医学应急中心、军事医学科学院放射医学研究所等单位的大力支持与帮助,在此一并感谢!

编者

2004年 6月

1

国外主要核(放射) 突发事件与教训

第一节 前苏联切尔诺贝利核突发事件与教训

1986年4月28日上午,瑞典斯德哥尔摩以北150 km处的福尔斯马尔克核电站的值班人员在退出管理区域时,大门监测器测出有异常放射性,同时核电站周围地面也测出了放射污染。瑞典当局一开始以为是所在核电站发生泄漏事件,十分紧张,准备将600余名职工撤离电站。接着,在瑞典东海岸一带也发现有广泛的放射性污染,瑞典国立防卫研究所对空气中尘埃进行了核素分析,测出是碘-131、铯-137和钚-103等放射性核素,并根据当日的风向和上气流,从而判断污染可能来自俄罗斯、乌克兰一带。瑞典政府当即询问前苏联政府,但没有得到答复。4月28日21时,前苏联在国立电视台新闻节目中首次承认发生了核突发事件。直到4月29日前苏联政府才通过塔斯社正式宣布,切尔诺贝利核电站的4号堆发生了堆芯爆炸事件。这是国际核电史上最严重的一次核突发事件,不仅使前苏联蒙受大批人员伤亡和超过200余亿卢布的巨大经济损失,而且在世界上也引起了强烈反响。

一、概况

切尔诺贝利核电站位于白俄罗斯—乌克兰的波列西耶多林低地的广阔地域的东部(图1-1),距白俄罗斯边境约10 km。核电站以西3 km为普里皮亚季镇,

居民约 5 万人,是电站的生活区;电站东南 18 km 是切尔诺贝利镇,人口约 1.25 万人。电站所处区域具有人口密度较低的特征,大约每平方千米 70 人,在电站周围 30 km 以内区域中,共有居民约 10 万人。全长 748 km 的普里皮亚奇河流经电站后汇入第聂伯河,再经基辅最后进入黑海,是基辅市的饮用水源。

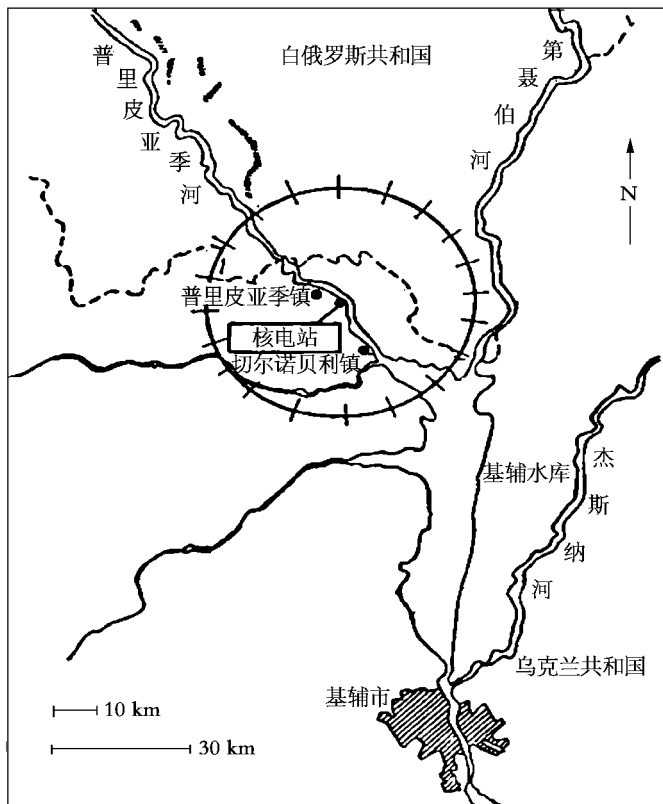


图 1-1 切尔诺贝利核电站的地理位置

切尔诺贝利核电站开始建造于 1970 年 1 月,共有 4 套机组,第 1、2 号机组并网发电于 1977 年,第 3、4 号机组投产于 1983 年。4 套机组都为 1 000 MW 的石墨慢化压力管式沸水堆 (РБМК-1000) (图 1-2),该反应堆用 1 700 吨 (1 吨 = 1 000 k g) 石墨砌块作为慢化压力体,约有 1 670 根平行的压力管垂直穿过石墨慢化体,燃料组件即插在这些垂直压力管内。另有 211 根控制棒管道也分布在石墨砌体中。堆芯尺寸为高 7 m,直径为 12 m,总计装有约 180 吨含 2% ^{235}U 的低浓缩的二氧化铀燃料。

在 РБМК-1000 反应堆中,载热剂是水,由于堆内链式反应放出的热量,使

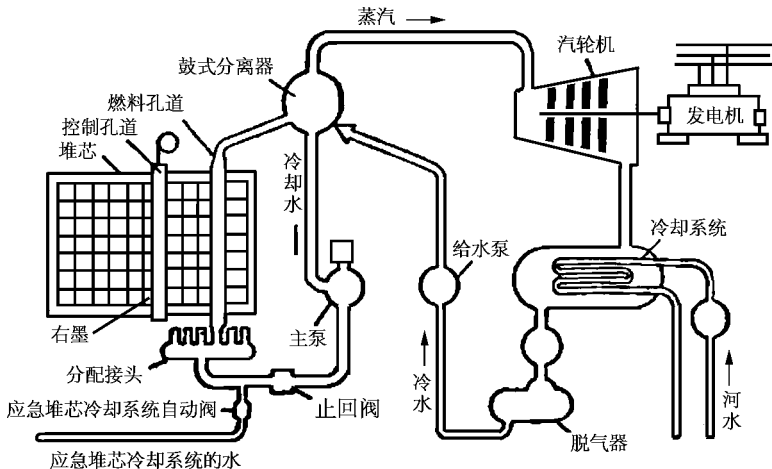


图 1-2 RBMK-1000的工作示意图

水被加热到沸腾,蒸汽将经过堆内工艺孔道循环,在孔道顶部通过蒸汽输送管而进入卧式汽水分离器,除水后,把蒸汽引入汽轮机进行发电。该堆共采用 8 台主循环泵来实现堆内水循环,其中 6 台工作,2 台备用。反应堆另备应急堆芯冷却系统、应急供电系统和一系列安全连锁装置。整个反应堆被安置在水泥的竖井之中,石墨砌块包含在厚度为 30mm 的圆柱形壳体内。

二、核突发事件发生经过

1986 年 4 月 25 日,核电站的第 4 号机组原计划进行停堆检修,但是在关闭核装置之前,根据核电站有关方面的指令,还必须进行一次旨在提高供电系统安全性的涡轮发电机组惰性转动供电试验,即利用涡轮发电机组无动力情况下的惯性,在蒸汽供应中断后,发电机依靠转子的惰性转动继续保持短时间供电,以确保反应堆的安全。第 4 号机组的惰性转动供电试验如下:

1986 年 4 月 25 日 13 时整(莫斯科时间)值班操作员根据反应堆停堆的原检修日程开始降低反应堆额定的运行功率。

13 时 05 分当热功率降至 1 600MW (约为额定功率的 50%) 时,从电网切除了第 4 号机组的 7 号汽轮发电机,机组本身切换到 8 号汽轮发电机。

14 时根据试验计划要求切断反应堆事故冷却系统。由于反应堆不能在没有事故冷却系统下运行,理应停堆。但是当时“基辅动力公司”的调度员不同意停堆,因此反应堆实际是在没有事故冷却系统的情况下仍继续运行。

23时 10分因得到可以停堆的许可,又开始按试验计划的规定,把反应堆的功率进一步降至 1 000MW ~700MW。然而操作员未能控制好,结果使反应堆的功率几乎降到零。在这种情况下,反应堆停堆,操作员没有考虑到这种利害关系,并又试图重新提高功率,但经努力未能成功。此时,反应堆中因 ^{135}I 衰变为 ^{135}Xe 的过程中使 ^{135}Xe 大量堆积,降低了堆芯的反应性。为了弥补这种反应性的降低,把功率再提上去,操作人员不顾反应堆安全所需的插入堆芯的控制棒不能少于 30根的规定要求,却在插入堆芯仅剩 6~8根控制棒的情况下继续运行,把大量控制棒都提到堆芯的顶部。

4月 26日 13时操作人员终于把反应堆的功率提高,但不是稳定在原试验计划要求的 1 000MW ~700MW 值,而是稳定在 200MW (约为额定功率的 6%) 水平上。为提高试验开始后反应堆活性区冷却的可靠性,操作人员在原 6台主循环泵运行的情况下又启动投入了 2台备用主循环泵,使冷却剂流量大大超过标准,造成蒸汽量减少。

13时 23分操作人员关闭了 8号汽轮发电机的截止调节阀,切断了对汽轮机的供汽,开始了惰转运行。为了不致发生自动停堆,以便在一次不成功后有可能再重复做试验,预先已切断了自动保护系统。此时,蒸汽流量的减少使压力逐渐上升,8台主循环泵中的 4台已从主电网单独由惰转的涡轮发电机组供电,随着涡轮发电机惰转的减速,使循环水总流量逐渐下降,引起蒸汽量的增加,且比额定功率运行时增加了许多倍。蒸汽量的增长从而引起了正反应性的进一步增大。

13时 23分 40秒,第 4号机组值班主任知道了事态的严重性,命令反应堆管理处主任工程师按下最有效的事事故保护按钮(A3-5)实行紧急停堆,但由于控制棒此时均处于堆芯顶部,在迫使控制棒下落时发生碰撞,最终停在中途,没有完全插入堆芯。接着操作人员断开控制棒驱动装置的电源,试图想靠控制棒自身重力作用而下落,但无济于事。

13时 24分,接连两次强烈爆炸,掀翻了反应堆厂房的房顶,爆炸后燃烧的石墨也飞到其他厂房顶上,厂房内大火共有 30余处,火焰(烟尘)升腾引起大约 1.8 km 高的大烟柱,并把大量的放射性物质扩散到前苏联的西部,北欧,甚至随风飘落到整个北半球。

三、核突发事件后的应急抢救

(一) 消防灭火

1986年4月26日13时28分,爆炸后仅过了4分钟,切尔诺贝利核电站消防队的值班人员首批来到事故地点;13时35分,普里皮亚季镇消防队也来到救火现场;14时54分,切尔诺贝利镇的消防队赶到,参与灭火。可是消防队员无一受过放射性条件下的灭火专门训练,他们奋不顾身的全力救火才基本扑灭了反应堆厂房屋顶与汽轮机大厅屋顶上的大火。在灭火过程中,许多人已受到很高的辐射剂量与受到有毒烟气的毒害,有的被送往医院,16时左右附近15个消防分队从基辅各地区集中到达事故现场,16时50分基本制止了火势的蔓延,18时35分才完全扑灭了大火。

核突发事件发生后,消防队员、抢救人员与核电站工作人员并未意识到辐射危害的严重性,有些地区的辐射水平高达每小时100 Gy。由于当时能用的监测仪器量程很窄,故无法测量现场各处的实际辐射水平,很多人受到严重照射。因此,在爆炸后1小时,就出现了首批急性放射病症状的伤员。

(二) 抢救行动

核突发事件发生时,许多人仅看到钢筋混凝土墙及天花板的摇动、塌落与倒塌,管道断裂,到处喷出来的热水和蒸汽流或着火,他们并没意识到反应堆已遭受严重破坏,大量放射性物质已释放到大气中,所有的人对如何消除这样大的核突发事件后果,在技术与心理上都没有准备。在核突发事件发生后的最初,第4号机组的工作人员谁也没有离开自己的岗位,想尽最大努力使核突发事件不发展到更危险的程度,继续“工作着”,在进行抢救的最初关键阶段,核电站的剂量监测部门却无能为力,任何人手头上都没有所需要的剂量测量仪器,人们不知道第4号机组及其周围的真实辐射水平,也就不能有效保护自己。由于前苏联当局认为他们的核电站不可能发生重大核突发事件,故这次核突发事件的应急行动是在毫无技术准备的情况下进行的。据说,总共有60万人参加了抢救和现场清理,如参加反应堆周围的清理、去污、修路,拆除与埋藏被污染的建筑物等。

(三) 控制放射性扩散

核突发事件早期为控制火势与反应堆放射性的扩散,前苏联当局派出了约1000余名空军及空勤人员在反应堆上空进行了数百次飞行,并用直升机向暴露的反应堆堆芯投下了5000余吨的硼、铅、砂、白云石与黏土,用于控制、封闭反应堆,屏蔽辐射和灭火,这些直升机空勤人员接受的外照射有效剂量为

140~260mSv。并派出约 1 万名施工人员在反应堆厂房底下设置冷氮注入系统,注入大量冷氮以降低堆芯温度。由于担心熔化的燃料可能会泄漏下来,与堆芯下卸压水池中的水接触而引起爆炸,造成放射性物质的向外释放扩散。科技人员对已被烧穿的反应堆底部的补救问题进行了研究,部队与志愿人员在强辐射环境下打开了一条临时通道,把充满在反应堆底部的水抽干,并在堆下建造一个混凝土隔板,以防止熔化的燃料漏入地下水池中。在反应堆封闭壳内执行任务的约 700 余名人员中,其中 5% 人员的外照射剂量大于 250 mSv,其他人员一般为 30~130 mSv。

(四) 伤员救治

鉴于 1986~1987 年,有数十万人参加了核突发事件现场的清理工作,受到的平均剂量约为 100 mSv。他们中约有 10% 的人员受到辐射的剂量约为 250 mSv,有百分之几的人员接受的剂量大于 500 mSv。而公众所受辐射的剂量(其中包括从禁区内撤出的约 11 万人)约有 10% 超 50 mSv,5% 超过 100 mSv。切尔诺贝利核突发事件致使 499 人住院观察,其中 237 人疑有急性放射病,在这次事故中有 28 人死于辐射照射(另有 2 人因非电离辐射原因死于核突发事件现场,总共死亡 30 人)。在住院治疗的 237 人中有 134 人被确诊为急性放射病,在死亡的 28 人中,有 26 例伴有全身表面积 50% 以上的皮肤损伤。上述所有的急性放射病病人及伴有严重皮肤损伤的病人在最有经验的医疗中心接受最好的抢救治疗,在所有死亡病例中无一例是居民。在伤员抢救中,每一个重病病人都有专门的医生和护士照顾,医务工作者竭尽全力,救死扶伤。

(五) 公众防护措施

据报道,核突发事件的第二天早上就对普里皮亚季镇进行挨家挨户的通知,要求当地居民关闭窗户在室内隐蔽,并分发碘片。据统计该镇的 4.5 万居民和 30 km 范围内的 71 个村庄的约 9 万居民都同时服用了碘片(碘化钾)。但也有资料报道,在核突发事件发生的当天,官方没有通知让居民留在室内,公共场所照常开放,许多大人和小孩仍在游乐场所内休闲玩乐,也未及时分发碘片,一些儿童与公众都受到了不必要的照射。其次,由于当时无足够的防护面具,以使许多民防官员与抢救人员在执行任务时都没有佩戴防护面具。在 4 月 26 日晚官方决定对普里皮亚季镇的 4.5 万居民进行撤离,共动员了 1 200 余辆公共汽车。从 4 月 27 日 14 时开始,在不到 3 小时内全部居民非常井然有序地撤到安全地区。4 月 28 日确定核电站周围 10 km 为撤离区,5 月 2 日又确定 30 km 范围的禁区,5 月 6 日撤离工作完成,共撤离了 13.5 万人,并禁止公众进入禁区。该禁区延伸到了白俄罗斯、俄罗斯与乌克兰 3 个相邻的区域,总覆盖面积约为 4 300 km²。5 月 10 日,画出了事故点周围地区的剂量率等值线地图,确定剂量率为

200 $\mu\text{Sv/h}$ 构成禁区边界线,共约有 1 100 km^2 ; 30 $\mu\text{Sv/h}$ 为严格控制区,约 8 000 km^2 。6~7月,又画出了长寿命放射性核素的污染水平地图。

四、放射性扩散与对公众健康的影响

1986年4月26日,从爆炸后毁坏的反应堆芯向外逸出的一股放射性气流,高达约 1 800m。在离事故地点 5~10 km,其放射性辐射水平约为 1 mSv/h 。这次事故,从堆芯向外排出的放射性总活度(不包括放射性惰性气体)估计约为 12×10^{18} Bq,共释放出放射性物质 6~8吨,这几乎是反应堆原存量的 3.5%。整个放射性释放过程持续了约 10天,至 1986年5月6日,放射性释放才基本结束。

释放的放射性核素的成分是相当复杂的,其中放射性碘和铯具有特别重要的放射生物学意义。放射性碘的半衰期短,在短期内有较大影响。而放射性铯的半衰期为数十年,有着长期而明显的放射生物学影响。据估算,这次事故碘-131向外释放的活度约为 2×10^{18} Bq,铯-137为 9×10^{16} Bq。这些值分别约占事故时堆芯放射性碘的 50%~60%,放射性铯的 20%~40%。

放射性污染的空气流,随大气逐渐向四周扩散,起初污染物主要沉积在西北部的白俄罗斯、俄罗斯与乌克兰境内。铯-137活度超过 185 kBq/m^2 的面积分别为 16 500 km^2 、8 100 km^2 和 4 600 km^2 ,这些区域被指定为“污染区”或严格控制区。放射性污染沉积活度大于 37 kBq/m^2 的,约有 146 100 km^2 ,在北欧和东欧还有许多区域的放射性污染沉积活度也大于 37 kBq/m^2 。铯-90的沉降仅限于事故地点附近地区,其沉积活度高于 100 kBq/m^2 的区域几乎完全在 30 km 区域内,大于 37 kBq/m^2 的区域均在 100 km^2 范围内。之后污染物随着高空气流又向芬兰、瑞典、波兰以及北半球其他区域扩散。

鉴于放射性碘是反应堆事故释放的主要放射性成分之一,在切尔诺贝利事故后的 10年中,受照儿童的甲状腺癌有了非常明显的增加,截至 1995年底已报道的儿童病例数为 800人,年龄为 0~15岁,其中白俄罗斯即有 400余人。从事故到该病诊断的潜伏期一般为 4~10年,平均为 6年。甲状腺癌的大多数病例均集中在反应堆事故释放造成的放射性污染严重地区。除甲状腺癌外,由事故辐射照射引起的其他癌症发病率目前还没有统计学意义的显著性差异,特别是白血病的发病率尚未见一致的可归因增长。