

秦山核电厂全厂断电事故厂外后果分析

樊申¹, 谢建伦², 张应超¹

(1. 中国原子能科学研究院 反应堆工程研究设计所, 北京 102413;

2. 中国原子能科学研究院 保健物理部, 北京 102413)

摘要:采用 MELCOR 和 MACCS 程序对秦山核电厂全厂断电事故的源项和厂外后果进行计算。该事故将引起厂外群体受到较大剂量的放射性照射,但辐照剂量不足以引发早期确定性健康效应。对可能采取的应急防护行动进行评估,确定最佳防护措施为:安全壳泄漏阶段实施隐蔽;若安全壳超压失效无法避免,应急计划区内应立即实施撤离。

关键词:全厂断电事故;源项;厂外后果;应急防护行动

中图分类号:TL334

文献标识码:A

文章编号:1000-6931(2006)06-0698-05

Analysis of Off-Site Consequence in Case of Station Blackout Accident for Qinshan Nuclear Power Plant

FAN Shen¹, XIE Jian-lun², ZHANG Ying-chao¹

(1. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-64, Beijing 102413, China;*

2. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-24, Beijing 102413, China*)

Abstract: Source term and off-site consequences in the case of a station blackout(SBO) accident were analyzed for Qinshan Nuclear Power Plant(QNPP) using MELCOR and MACCS codes. Doses of inhabitants are biggish, but the doses are not very large and few off-site early health effects would occur. Several kinds of emergency protective actions are evaluated using MACCS. According to the evaluation, the best emergency protective action is sheltering after the containment leak and quick evacuation after the containment failure by overpressure if the containment failure is unavoidable.

Key words: station blackout accident; source term; off-site consequence; emergency protective action

目前的厂外后果的评价工作,其源项数据一般来源于核电厂最终安全分析报告(FSAR)中的事故分析,这些数据往往在一系列极为保守的假定下估算得到。此外,核设施厂外应急所考虑的事故主要是严重事故,FSAR中事故

分析所覆盖的范围不能满足应急响应的需要。另一来源是 WASH-1400 给出压水堆严重事故源项,但这组数据特别保守,且又与电厂的实际情况偏离甚远。因此,很有必要将源项计算和后果分析联系起来进行系统研究。这样,可获

得更接近于实际情况的源项数据,计算的厂外后果也会更为实际和可靠。

本文利用 MACCS^[1,2] 程序分析秦山核电厂全厂断电事故的厂外后果。分析中采用 MELCOR^[3] 程序计算获得的事故源项。

1 事故源项

发生全厂断电事故时,如果不采取任何措施,将发展成为堆芯熔化、压力壳熔穿、安全壳超压失效的严重事故。

用 MELCOR 程序对秦山核电厂全厂断电事故序列的源项进行计算^[4]。根据计算情况,秦山核电厂发生全厂断电事故后约 1.8×10^5 s

安全壳开始泄漏,约 8.76×10^5 s 安全壳超压失效。安全壳泄漏阶段向环境释放放射性裂变产物的速度很慢,累计释放 3.5 kg。安全壳超压失效后,约 1 000 s 内释放的裂变产物约占释放总量的 90%。随后,放射性裂变产物持续向环境释放,且随着安全壳内压力降低,释放速度越来越慢。至计算结束(事故后 10^6 s),累计向环境释放的放射性裂变产物质量为 104.2 kg。

根据 MACCS 的输入要求,将上述放射性裂变产物释放过程划分为 4 个烟羽段,各段详细信息列于表 1。表 2 为各类放射性核素在各烟羽段中的释放份额。

表 1 各烟羽段详细信息

Table 1 Detailed information of each plume segment

烟羽段	开始释放的时间/s	释放持续时间/s	释放高度/m	释热率 ¹⁾ /W	
				开始时	结束时
安全壳低压泄漏	180 000	694 300	11	1.70×10^4	3.44×10^4
安全壳超压失效	874 300	1 300	25	2.42×10^9	8.64×10^6
后期释放	875 600	94 400	25	7.09×10^6	0 ²⁾
晚期释放	970 000	30 000	25	0	0

注:1) 烟羽段释热率的最值一般分别出现在释放开始时和结束时

2) 此时的安全壳破口处流动复杂,流动方向不停变化,所采用的程序无法计算此时释放的烟羽段释热率

表 2 各时段各组裂变产物释放到环境的份额

Table 2 Fraction released into environment of each fission products class

核素类别	释放到环境的份额			
	安全壳低压泄漏	安全壳超压失效	后期释放	晚期释放
Xe/Kr	6.86×10^{-2}	8.17×10^{-1}	1.01×10^{-1}	7.00×10^{-3}
Cs	4.13×10^{-5}	1.51×10^{-4}	1.53×10^{-2}	0
Ba	8.35×10^{-8}	9.46×10^{-7}	0	0
I	1.14×10^{-5}	7.12×10^{-4}	2.29×10^{-2}	0
Te	9.41×10^{-5}	6.58×10^{-4}	7.16×10^{-3}	0
Re	7.55×10^{-9}	1.12×10^{-9}	0	0
Mo	6.81×10^{-8}	5.17×10^{-8}	0	0
Ce	3.16×10^{-9}	4.98×10^{-8}	0	0
La	2.77×10^{-9}	4.32×10^{-8}	0	0
Cd	3.12×10^{-7}	1.51×10^{-6}	0	0
Sn	3.24×10^{-6}	1.74×10^{-5}	0	0

2 厂外后果计算

2.1 计算模型参数

源项数据取 MELCOR 计算值。将计算值作为 MACCS 程序输入源项时,根据 MACCS 对输入数据的要求,将释放的时间提前,释放持续时间缩短。修改后源项信息列于表 3。释放

表 3 修改的源项信息

Table 3 Information of modified source term data

烟羽段	事故发生到开始释放的时间/s		释放持续时间/s	
	MELCOR 计算值	修改值	MELCOR 计算值	修改值
安全壳低压泄漏	180 000	170 000	694 300	4 300
安全壳超压失效	874 300	174 300	1 300	1 300
后期释放	875 600	175 600	94 400	5 000
晚期释放	970 000	270 000	30 000	3 000

从秦山核电厂厂区气象站和铁塔气象站 1998 年全年的气象记录中提取 MACCS 所需的气象数据,并整理成 MACCS 所需的气象数据格式,共计 8 760 条气象记录。计算中采用分层抽样方法,从全年气象数据中提取有代表性的气象条件进行计算。

厂外人口分布采用 1998 年秦山核电厂周围的人口分布统计数据^[4]。

MACCS 的大气扩散计算采用高斯烟羽模式,需要厂址地区的大气弥散参数。这部分数据采用现场和风洞模型实验测量所得的秦山核电厂地区水平和垂直扩散参数^[5]。对于其它与厂址有关的参数,例如,混合层高度、干沉降速度、屏蔽因子等,均通过敏感性分析选取较为保守的值。

剂量转换模型以及早期确定性健康效应模型的参数采用 MACCS 程序缺省值^[3]。

2.2 计算结果

1) 释放的放射性活度

应用 MACCS 程序,结合 MELCOR 程序计算的各类放射性核素的释放份额和输入的堆芯放射性核素盘存量,计算出各烟羽段向环境释放的放射性活度。各段依次释放 1.07×10^{17} 、 1.26×10^{18} 、 2.06×10^{17} 、 9.27×10^{15} Bq, 累计释放放射性活度 1.57×10^{18} Bq。

2) 烟羽轴线下个体所受剂量

图 1 所示为分层抽样条件下计算的全身剂

时间提前将缩短放射性裂变产物在安全壳内衰变的时间,引起释放的放射性活度增加;释放持续时间缩短将使放射性照射更为集中。因此,上述两方面修改将使计算结果更加保守。此外,事故开始时刻堆芯放射性核素盘存量取自文献^[5]。

量以及肺、红骨髓、甲状腺剂量随距离的变化(95%置信上限值)。按相关的核电厂安全导则规定,全身剂量达到 5~50 mSv 或某重要器官剂量达到 50~500 mSv 时,需要实施隐蔽,全身剂量达到 50~500 mSv 或某重要器官剂量达到 500~5 000 mSv 时,需要实施撤离^[5]。上述限值与事故导致的剂量比较可得,发生全厂断电引发的严重事故时,按相关的核电厂安全导则,可采取的防护措施是约 5 km 范围内撤离,30 km 范围内实施隐蔽。

3) 个体早期确定性健康效应风险随距离的变化

发生全厂断电引发的严重事故时,应急阶段各距离处厂外个体发生早期确定性健康效应

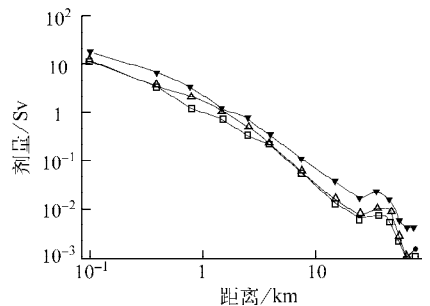


图 1 应急阶段烟羽轴线下重要器官剂量
Fig. 1 Centerline doses of important organs during emergency phase

□——红骨髓;●——肺;▼——甲状腺;△——全身

的平均风险示于图 2(95%置信上限值)。

平均个体风险由某一距离处所有子区的风险之和除以子区数得到。在 0~0.2 km 范围内发生早期死亡或前驱呕吐的风险均在 10% 左右,发生肺炎的风险约为 3%,发生甲状腺机能减退的风险约占 1%。在 0.2 km 以外的地区,发生各种严重确定性健康效应的风险迅速降低;0.2 km 之外地区,发生肺炎的风险降至 0;在 1 km 之外地区,发生早期死亡或甲状腺机能减退的风险降至 0;在 2 km 外的地区,所有计算的早期健康效应的风险均降至 0。

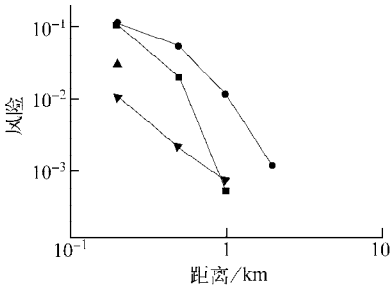


图 2 早期确定性健康效应平均个体风险

Fig. 2 Average individual risks of early health effects

■——早期死亡;●——前驱呕吐;
▲——肺炎;▼——甲状腺机能减退

4) 出现各早期健康效应的人数

通过计算的 0~5 km 范围(应急计划区内)和 0~80 km 范围内出现早期健康效应的人数比较,全厂断电事故后,两个范围内出现早期健康效应的人数相同,说明事故后仅在 0~5 km 的应急计划区内会出现早期健康效应,其人数列于表 4。在所考虑的几种健康效应中,除前驱呕吐外,其他的早期健康效应出现的可能性极小。

表 4 应急阶段应急计划区内出现早期健康效应的人数

Table 4 Early health effects cases in emergency planning zone during emergency phase

健康效应名称	人数期望值	95%置信上限值人数
早期死亡	0.17	0.00
前驱呕吐	1.34	0.476
肺炎	2.30×10^{-2}	0.00
甲状腺机能减退	5.08×10^{-2}	0.017

5) 早期死亡半径

早期死亡半径指预期会出现早期死亡的区域范围。对所有气象序列,早期死亡半径的 95%置信上限值为 1.03 km。对所有气象序列计算的早期死亡半径最大值为 2 km。此结果也说明全厂断电引发的严重事故导致的早期健康效应集中在厂址附近地区。

3 应急响应措施效果分析

秦山 I 期核电厂烟羽应急计划区内的主要防护措施为隐蔽、发放稳定碘片和撤离。鉴于撤离可能带来的风险和代价较大,经综合分析,确定烟羽应急计划区的主要防护措施为隐蔽、发放稳定碘片并同时考虑撤离准备。本文对这些措施的效果进行了分析。在 MACCS 中,无服用稳定碘片的应急防护措施的模型,因此,本文未计算此项措施的效果。

本文假设,放射性物质开始释放之后通知厂外应急响应部门启动保护措施,随后,开始应急行动方案。因为事故发生到安全壳泄漏的时间很长,足以做好应急行动的准备工作,因此,设定的应急行动延迟时间较短。假设应急行动方案有 3 种^[6]: 1) 撤离速度 1.5 km/h,延迟 2 h; 2) 撤离速度 10 km/h,延迟 20 min; 3) 隐蔽 1 d,延迟 20 min,隐蔽结束后,隐蔽者被转移,而不再接受更多的剂量。

首先计算仅出现安全壳泄漏而未发生安全壳超压失效,即只有第 1 个烟羽段释放出来的情况。此种源项情况结合分层抽样气象条件计算,所得的烟羽轴线下个体 7 d 所受的重要器官剂量随距离变化示于图 3。由图 3 可见,如果仅发生安全壳泄漏而不发生安全壳超压失效,厂外群体的重要器官所受剂量基本上低于采取撤离防护行动的低限值。因此,这个阶段只需对离厂区很近的群体采取隐蔽的防护措施。如果安全壳超压失效无法避免,则需要通知厂外应急部门采取进一步的应急响应行动。

考虑到安全壳超压失效到被发现有一时间间隔,因此,本文设定,安全壳超压失效之后延迟 600 s 通知应急部门开始响应。在上述条件下,对 3 种可能的应急行动方案进行了计算。图 4 所示为不同应急行动方案下烟羽轴线下方的红骨髓剂量。计算结果表明,这 3 种方案都

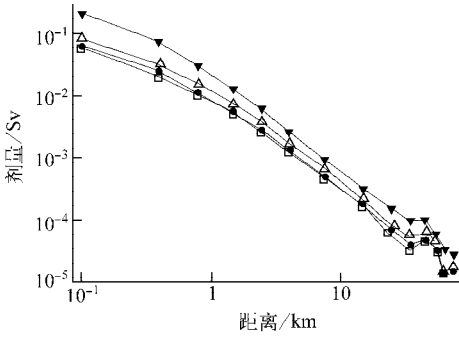


图3 安全壳低压泄漏引起的烟羽段轴线下剂量

Fig. 3 Centerline doses caused by containment low pressure leak

□——红骨髓; ●——肺; ▼——甲状腺; △——全身

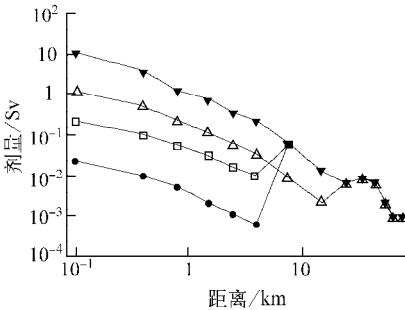


图4 不同应急行动方案烟羽段轴线下红骨髓剂量

Fig. 4 Centerline red marrow doses of different emergency actions

●——方案1; □——方案2; △——方案3; ▼——无行动

能有效地降低红骨髓剂量,但仅采用隐蔽的防护措施仍将受到较大剂量的照射,只有撤离才是有效的防护措施。其中,延迟时间短、速度快的撤离,即应急行动方案2提供了最好的防护效果。

本文所计算源项的特点是安全壳先泄漏、后失效,失效后放射性物质才开始大规模释放。由于安全壳泄漏阶段向环境释放的放射性裂变产物不足以给厂外群体造成威胁,因此,可在安全壳开始泄漏之后和安全壳超压失效前实施隐蔽并做好撤离的准备,在安全壳超压失效后快速撤离出危险区域。如果能控制住事故进程,避免了安全壳超压失效,则无须采取撤离的防护行动。这样的应急响应计划既可避免厂外群体受到大剂量的放射性照射,又可避免不必要的防护行动及经济代价。

4 结论

利用 MELCOR 程序和 MACCS 程序对全厂断电事故发展成严重事故并造成厂外后果的一系列过程进行了计算,获得了事故的源项和厂外后果数据。根据计算结果,全厂断电事故且事故序列发展到安全壳超压失效后,将造成厂外群体受到大剂量的放射性照射,但剂量不足以引发大量的早期健康效应。为避免厂外群体受到大剂量照射并避免不必要的防护行动,发生全厂断电事故后,最佳防护措施是在安全壳泄漏阶段实施隐蔽,并做好撤离行动的准备,在安全壳超压失效后立刻实施延迟时间短、速度快的撤离。

参考文献:

- [1] CHANIN D I, SPRUNG J L, RITCHIE L T, et al. MELCOR accident consequence code system (MACCS) [M]. Vol 1. USA: Sandia National Laboratories, 1990; 1-35.
- [2] JOW J L, SPRUNG J A, ROLLSTIN L T, et al. MELCOR accident consequence code system (MACCS) [M]. Vol 2. USA: Sandia National Laboratories, 1990; 1-13.
- [3] SUMMERS R M, STEPHEN W W, PAUL D, et al. MELCOR computer code manual[M]. Vol 1. USA: Sandia National Laboratories, 1991; 1-19.
- [4] 樊申,张应超,季松涛. 秦山 I 期核电厂全厂断电事故源项研究[J]. 原子能科学技术, 2006, 40(5): 553-558.
FAN Shen, ZHANG Yingchao, JI Songtao. Study on source terms in station blackout accident of Qinshan I nuclear power plant [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2006, 40(5): 553-558(in Chinese).
- [5] 何国祥,顾汉,杜风雷,等. 秦山核电厂环境影响报告书(试运行阶段)[R]. 浙江:秦山核电公司,2001.
- [6] 国家核安全局,国家环境保护总局. 核事故辐射应急时对公众防护的干预原则和水平, HAF0703[R]. 北京:国家核安全局,1990.
- [7] 梁亮. 核电厂应急计划区的研究[D]. 北京:清华大学,2000.