

# 中国先进研究堆严重事故辐射后果研究

张海霞, 刘森林, 姜希文

(中国原子能科学研究院 辐射安全研究部, 北京 102413)

**摘要:** 针对高功率研究堆建在大城市远郊区的特殊情况, 提出了中国先进研究堆(CARR)严重事故辐射后果的验收准则。为进行 CARR 严重事故排放方案的设计, 研究了不同事故排放方案下, CARR 发生严重事故时的环境辐射后果。最终推荐提高反应堆大厅密封性并优化事故后密闭与排风组合排放方案, 实现了 CARR 工程无场外应急的安全设计目标。

**关键词:** 中国先进研究堆; 严重事故; 辐射后果; 场外应急

中图分类号: TL411; TL73

文献标识码: A

文章编号: 1000-6931(2007)03-0331-04

## Research on Radiological Consequences of Severe Accident of China Advanced Research Reactor

ZHANG Hai-xia, LIU Sen-lin, JIANG Xi-wen

(Radiation Safety Department, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** Aimed at a special situation of a research reactor with high power to be constructed in the suburb of a big city, the acceptance criteria on the radiological consequences of severe accidents in China Advanced Research Reactor (CARR) were put forward. In order to carry through the design of discharging scheme of CARR's severe accidents, the environmental radiological consequences under various accidental discharging schemes were researched when a severe accident probably occurs in CARR. A combination scheme of accidental discharging was recommended by improving the airtight of reactor hall and optimizing the starting time and period of obturation and ventilation. The target of CARR project safety design that there is no off site emergency situation is realized.

**Key words:** China Advanced Research Reactor; severe accident; radiological consequence; off site emergency

### 1 验收准则的提出

近年来, 高功率研究性反应堆建在城市与郊区之间的过渡地带已是一发展趋势。国家核

安全审管部门对这类研究堆的建设提出了明确要求: 必须提高研究堆的固有安全性设计, 必须应用安全壳或包容的设计理念, 从设计和建造

上保证不能有场外应急。对于中国先进研究堆(CARR)工程,要在设计和建设过程中采取工程缓解措施,保证达到无场外应急状态的安全设计目标。

目前,我国没有明确规定研究堆设计与建造实现无场外应急的设计标准,而只有判断采取各类应急措施的行动水平。在国家核安全导则 HAD002/06《研究堆应急计划和准备》、HAD002/03《核事故辐射应急时对公众防护的干预原则和水平》以及国防科学技术工业委员会、国家环境保护总局和卫生部联合发布的《核或辐射应急的干预原则与干预水平》(2002)中均对采取各类应急措施的行动水平做出了相应的规定。研究这些导则和规定发现:只规定了事故已经发生后需采取干预措施的一个行动起始剂量(率)水平,而不能直接用于指导工程设计,即没有规定核设施设计的验收标准;判断是否需要采取干预措施,是依据事故累积剂量和事故剂量率,实质上是控制事故期间的排放总量和排放速率;早期的标准是用预期剂量来表示的,最新的标准是用可避免剂量表示的。

根据国家核安全法规的实质性要求,充分考虑到 CARR 工程建设的场址地处首都北京,研究提出 CARR 工程严重事故无场外应急的设计验收准则是:1) CARR 发生严重事故后 0~8 h 期间的事故排放所致场址边界处公众事故预期剂量不大于 5 mSv; 2) CARR 发生严重事故时,整个事故持续释放期间的排放所致场址边界处公众事故预期剂量不大于 10 mSv。该验收准则通过了国家核安全审管部门的安全审查。

## 2 CARR 严重事故

### 2.1 严重事故假设

根据 CARR 工程的安全分析结论<sup>[1]</sup>,假设 CARR 在热功率 60 MW 水平上持续运行 50 d 时,由于一系列的异常事件未得到有效控制,发生了 3 盒燃料组件燃料板熔化事故。

假设事故时堆芯放射性瞬时从包壳中迁移释放至水池,经池水滞留后直接进入大厅,与大厅内的气体混合。当应急通风系统开启时,大厅内的放射性核素经应急通过滤网过滤后,从烟囱排放到环境中。

### 2.2 环境辐射后果

我国没有推荐评估严重事故环境辐射后果的技术导则,也没有明确规定严重事故排放过程的技术规定。本次辐射环境后果估算参照美国核管会的管理导则 1.145,并采用 PAVAN 程序进行估算。当 CARR 发生严重事故时,快速切换到应急通风系统,放射性核素经两级事故过滤系统排入大气环境。经计算,场址最近边界处(NW, 360 m)公众 0~8 h 期间事故预期剂量为 27.9 mSv,不能满足无场外应急设计验收准则的要求。

## 3 组合排放方案的环境辐射后果

为减小 CARR 严重事故的环境辐射后果,有两种可选择的技术路线:提高排放的高架释放份额;密封厂房,减少环境释放量。

提高排放的高架释放份额可通过提高排放烟囱的高度和增加事故排风量两种途径实现。考虑 CARR 工程设计与建造的可能性,增加烟囱高度的安全性以及国际同类型研究堆烟囱的设计高度,首先排除了增加烟囱高度的方案。因此,主要研究通过提高事故时的排风量,以提高烟囱出口处的排气速度,增加高架释放份额,降低公众最大个人事故辐射剂量的方案,简称“直接排放方案”。

发生严重事故时,快速关闭通风系统,将放射性核素密封在反应堆大厅内,降低事故直接排放到环境的放射性核素总量的方案,简称“密封泄漏排放方案”。

### 3.1 直接排放方案

当发生 3 盒燃料组件燃料板熔化事故时,经计算,欲使 0~8 h 期间场址边界处预期公众事故辐射剂量满足验收准则的要求,高架释放份额必须大于 85%。高架释放份额计算模式参见文献[2]。为判断应急通风能力能否实现所要求的高架释放份额,计算了高架释放份额与烟囱出口烟气流速、烟囱出口内径、事故排风量的关系。满足此条件所需的事故载带风量与可行的烟囱内径有关。经计算,其最小值为 13 000~39 000 m<sup>3</sup>/h,远高于 CARR 最大设计应急通风能力,是难于实现的。

### 3.2 密封泄漏排放方案

假设事故时快速关闭正常通风系统,将事

故时产生的放射性物质密封在反应堆大厅厂房内,放射性核素的释放主要通过贯穿件,以地面源的方式缓慢释放到大气环境。在这种排放方式下,5%、2%、1%泄漏率(每天泄漏的体积与密闭体积之比)条件下的环境辐射后果计算结果列于表1。

表1 不同泄漏率下场址边界最近距离处公众事故预期剂量

Table 1 Projected dose to the public at the nearest site boundary under variant leakage rate

泄漏率	事故假设	预期剂量/mSv	
		0~8 h	0~720 h
5%	1 盒熔化	1.91	2.81
	3 盒熔化	5.74	8.44
	5 盒熔化	9.56	14.1
	21 盒熔化	38.7	56.9
2%	1 盒熔化	0.77	1.17
	3 盒熔化	2.30	3.52
	5 盒熔化	3.84	5.87
	21 盒熔化	15.5	23.7
1%	1 盒熔化	0.38	0.60
	3 盒熔化	1.15	1.79
	5 盒熔化	1.92	2.98
	21 盒熔化	7.77	12.1

由计算结果可知,当反应堆大厅厂房的泄漏率为2%时,对于发生小于5盒燃料组件燃料板熔化事故,能实现无场外应急状态的安全设计目标。因此,根据上述初步分析结果,采用密封泄漏排放方案,可实现CARR工程严重事故时无场外应急状态的安全设计目标。该方案也符合国家核安全监管部门提出的加强工程安全措施,提高安全水平设计的要求。

### 3.3 推荐事故排放设计方案

根据CARR严重事故假定,经进一步计算,在泄漏率为2.5%条件下,当CARR发生严重事故,即3盒燃料组件燃料板熔化事故时,场址最近边界NW方位360m处公众最大个人事故辐射剂量约为:0~8h期间,4.0mSv;0~720h期间,5.5mSv。符合验收准则。同时,

根据秦山第三核电站安全壳承压设计与施工建造的特点和经验反馈,CARR工程反应堆大厅密封性设计值为2.5%泄漏率在工程上是是可以实现的。因此,推荐CARR工程设计采用密封泄漏排放方案,大厅密封性设计值采用2.5%泄漏率。为达到这一密封性设计要求,CARR工程参照秦山三期核电站反应堆厂房安全壳使用的涂装材料和工艺,采用环氧树脂涂装作为密封厂房的内衬方案,这一方案在工程上是是可以实现的。

## 4 排放方案优化及其环境辐射后果

当CARR发生严重事故时,控制系统将关闭所有通风系统以及反应堆大厅的所有环境通道,将反应堆大厅和通风系统密封,控制事故排放量。随着事故的发展,大厅与通风系统密封后,将引起大厅压力升高。在整个事故释放期间,一直保持反应堆大厅密封状态将导致反应堆大厅压力超过设计压力值。因此,需对反应堆厂房密闭和排风的方案进行进一步的优化研究,提出适宜的密闭与排风组合设计方案。

### 4.1 事故释放量计算

考虑判断事故排放的环境辐射后果满足CARR工程无场外应急状态的需要,假设CARR发生严重事故后,分别估算反应堆大厅在密闭2、4、5、6、7、8、16、24、48h后开启事故通风系统,通风系统开启持续时间分别为1、2、8、24、72、720h。根据事故释放的物理模型,结合密闭与排风的各种组合情况,对54种释放组合的环境释放量进行了计算<sup>[3]</sup>。

### 4.2 优化排放方案的环境辐射后果

对54种释放组合情况下场址边界最近距离处事故释放期间的公众事故预期剂量进行计算,0~8h和整个事故持续释放期间(0~30d)的公众事故预期剂量分别列于表2和表3。

由表2可知,场址边界最近距离处0~8h期间的公众事故预期剂量最高值为26.0mSv,最低值为3.95mSv。

由表3可知,场址边界最近距离处0~30d期间的公众事故预期剂量最高值为34.0mSv,最低值为5.49mSv。

表2 场址边界最近距离处0~8 h内公众事故预期剂量

Table 2 Projected dose to the public at the nearest site boundary during 0-8 h

反应堆大厅密闭时间/h	事故通风系统开启持续不同时间(h)下的公众事故预期剂量/mSv					
	1	2	8	24	72	720
2	10.4	15.2	26.0	26.0	26.0	26.0
4	7.82	10.8	15.1	15.1	15.1	15.1
5	7.01	9.41	11.3	11.3	11.3	11.3
6	6.39	8.32	8.32	8.32	8.32	8.32
7	5.91	5.91	5.91	5.91	5.91	5.91
≥8	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95	3.95

表3 场址边界最近距离处0~30 d内公众事故预期剂量

Table 3 Projected dose to the public at the nearest site boundary during 0-30 d

反应堆大厅密闭时间/h	事故通风系统开启持续不同时间(h)下的公众事故预期剂量/mSv					
	1	2	8	24	72	720
2	11.8	16.7	28.8	32.2	33.7	34.0
4	9.27	12.3	18.9	21.6	23.0	23.3
5	8.46	10.8	15.6	18.0	19.4	19.7
6	7.84	9.75	13.0	15.1	16.5	16.8
7	7.37	8.23	10.9	12.9	14.2	14.6
8	6.32	7.03	9.36	11.1	12.4	12.7
16	5.67	5.89	6.86	7.72	8.91	9.22
24	5.51	5.59	6.00	6.82	7.79	8.09
48	5.49	5.54	5.87	6.56	6.99	7.25

## 5 结论

综合分析上述计算结果,严重事故发生后,如果厂房密封16 h以上,然后开启事故应急通风系统,通风系统开启持续时间不受限制,场址边界最近距离处0~8 h期间的公众事故预期剂量则为3.95 mSv,0~30 d(事故持续释放期间)公众事故预期剂量≤9.22 mSv,能够满足验收准则的要求,同时亦满足CARR厂房大厅压力维持在设计压力范围内的要求。通过分析,为尽可能减少环境后果,建议CARR工程设计采用“发生严重事故后厂房密封48 h,然后开启事故应急通风系统”的方案。此时,厂房大厅压力将达9 kPa,小于设计压力10 kPa。在这种排放方案下,场址边界最近距离处0~8 h期间的公众事故预期剂量为3.95 mSv,事故持续释放期间厂址边界最近距离处公众事故

预期剂量为7.25 mSv。

本工作研究确定了CARR工程无场外应急状态的验收准则,同时提出了满足该准则的密封设计要求和事故时的排放方案,已应用于CARR工程设计中。

## 参考文献:

- [1] 中国原子能科学研究院. 中国先进研究堆(CARR)初步安全分析报告[R]. 北京:中国原子能科学研究院, 2002.
- [2] 潘自强,陈竹舟,王志波,等. 中国核工业三十年环境辐射质量评价[M]. 北京:原子能出版社, 1991:34.
- [3] 张海霞,刘森林,姜希文. 中国先进研究堆(CARR)严重事故优化排放量计算书[R]. 北京:中国原子能科学研究院, 2003.