

文章编号: 0258-0926(2018)S2-0103-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2018.S2.0103

中国工程试验堆严重事故辐射后果研究

冯 建, 刘爱华, 沈海波, 邱立青, 赵国正, 袁志敏, 卿明兵

中国核动力研究设计院, 成都, 610213

摘要: 为保证中国工程试验堆 (CENTER) 在严重事故工况下辐射后果满足安全监管要求, 且不必采取场外应急措施, 需对严重事故工况下放射性物质排放方案进行设计。本文从密闭厂房泄漏率、应急通风系统排风量、密闭方式等方面开展分析, 对辐射后果的变化规律进行了研究。结果表明, CENTER 密闭厂房泄漏率应采用 2%/d, 并应采取“严重事故初期密闭, 8 h 后开启应急通风系统”的排风方案。

关键词: 中国工程试验堆 (CENTER); 严重事故; 辐射后果

中图分类号: TL732 **文献标志码:** A

Research on Radioactive Consequences of Severe Accident of China Engineering Test Reactor

Feng Jian, Liu Aihua, Shen Haibo, Qiu Liqing, Zhao Guozheng, Yuan Zhimin, Qing Mingbing

Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China

Abstract: In order to ensure that the radioactive consequences of China Engineering Test Reactor meet the requirements of safety supervision under the severe accident condition and that no out-of-site intervention measures are required, it is necessary to design the discharging scheme of radioactive substances under the severe accident condition. This paper mainly analyzes the leakage rate, the air exhaust volume and the sealed mode, and studies the change rules of radioactive consequences. The results show that the airtight building leakage rate of 2%/d and the discharging scheme of “the emergency ventilation system is closed during the preliminary stage and opened after the 8 h sealed time” should be adopted for China Engineering Test Reactor.

Key words: China engineering test reactor, Severe accident, Radioactive consequence

0 引 言

近年来, 国家核安全监管部对研究堆的建设提出了明确的要求: 反应堆在设计和建造时须采取必要的工程措施及缓解事故后果的技术措施, 以保证在事故工况下不需进行场外应急。中国工程试验堆 (CENTER) 的设计采用了密闭厂房和应急通风系统等措施, 可在事故工况下对放射性物质的排放量和排放速率进行有效控制。通常情况下, 严重事故导致的辐射后果影响是最大的。因此, 本文以严重事故为研究对象, 通过讨论密闭厂房泄漏率、应急通风系统排风量、密闭

方式等因素, 为 CENTER 事故时排放方案的设计提供参考, 以确保其辐射后果满足“无需采取场外干预措施”的安全监管要求。

1 研究方法

1.1 无场外应急接受准则确定

根据 HAD002/06《研究堆应急计划和准备》的要求, 为保证 CENTER 不采取场外干预措施, 严重事故划定的应急计划区需不超出非居住区范围^[1] (距反应堆半径 500 m 内)。

目前, 我国对研究堆设计阶段实现无场外应

收稿日期: 2018-08-30; 修回日期: 2018-11-14

作者简介: 冯 建 (1982—), 男, 副研究员, 硕士研究生, 现从事反应堆辐射防护与屏蔽设计研究工作

急要求的接受准则未作明确规定^[2]。在综合考虑研究堆自身特点、剂量效应情况、经济性等因素后,将 CENTER 在严重事故下无场外应急的接受准则暂定为:严重事故短期内(0~8 h)非居住区边界公众最大个人累计剂量不超过 5 mSv,整个事故期间(0~30 d)非居住区边界公众最大个人累计剂量不超过 10 mSv。

1.2 严重事故源项确定

CENTER 燃料组件为套管型燃料组件,其流道结构具有过滤功能。一般而言,大尺寸异物无法进入组件流道内,小尺寸异物可进入流道内,但由于组件内冷却剂流速高,小尺寸异物一般会随着冷却剂流动而被带出。此外,组件入口的上接头周向开有多个入水口,几乎不可能发生多个入水口完全堵塞的情况。因此,CENTER 燃料组件不易发生因异物阻塞而导致熔化的情况。概率安全分析也表明,CENTER 发生燃料组件熔化的概率极低^[3]。

即使发生了一盒燃料组件熔化的低概率事件,从初期组件出现局部破损到发展为后期组件熔化也需要较长时间。由于 CENTER 堆设有组件破损探测系统和在线水质检测系统,能及时发现组件是否出现破损,一旦有异常情况发生,可立即采取停堆等相关措施。同时,由于燃料组件带有较厚的六角形外套管,其套管和燃料组件间的水隙完全可以确保其熔化只发生在本盒组件内,不会导致其周围燃料组件熔化^[4]。因此,将 CENTER 严重事故源项确定为 1 盒燃料组件熔化。

1.3 计算方法

1.3.1 环境释放源项计算 严重事故发生后,反应堆放射性物质进入堆水池中。其中,粒子碘被水池水全部截留,其余形态的碘及惰性气体则进入密闭厂房大气中,并通过密闭厂房低架泄漏以及应急通风高架排放两种途径向环境释放。环境释放源项的计算公式如下:

$$B_i(t) = \sum_j \left\{ \frac{F_j}{F_j + \lambda_i} \cdot A_{ij} \cdot \left[1 - e^{-(F_j + \lambda_i)(t - t_j)} \right] \right\} \quad (1)$$

式中, $B_i(t)$ 为 t 时刻核素 i 的放射性活度,Bq; F_j 为 j 阶段密闭厂房的总泄漏率(包括低架及高架), s^{-1} ; λ_i 为核素 i 的衰变常数, s^{-1} ; t_j 为 j 阶段初始时刻,h; A_{ij} 为 j 阶段初始时刻密闭厂房

内核素 i 的放射性活度,Bq。

1.3.2 事故剂量计算 释放到环境中的放射性物质在大气弥散(包括输运及沉降)作用下向边界处扩散,边界处的放射性物质会对公众产生辐射影响。采用 PAVAN 计算 CENTER 厂址 95%概率水平下的事故短期大气弥散因子,并利用剂量转换因子计算边界处公众个人有效剂量。CENTER 在严重事故下造成的放射性剂量,主要来源于 3 个照射途径:烟云浸没外照射、地面沉积外照射和吸入内照射。

2 结果与分析

2.1 泄漏率对辐射后果的影响

假定严重事故期间应急通风系统关闭,仅以低架泄漏方式向环境释放放射性物质。选定低架泄漏率(每天泄漏体积与密闭体积之比)分别为 5%/d、3%/d、2%/d、1%/d,当 1 盒燃料组件熔化时,CENTER 非居住区边界处在事故发生 0~8 h 和 0~30 d 期间的个人剂量计算值见表 1。

表 1 不同泄漏率 CENTER 非居住区边界处个人剂量
Table 1 Individual Effective Dose under Different Leakage Rates at the Boundary of CENTER Exclusion Area

泄漏率/%·d ⁻¹	全身有效剂量/mSv	
	0~8 h	0~30 d
5	5.36	15.26
3	3.22	9.66
2	2.15	6.63
1	1.08	3.42

由表 1 可知,密闭厂房泄漏率越大,相同的事事故持续时间内非居住区边界处个人剂量越高,这是由于通过低架泄漏的放射性物质越多所致。当密闭厂房泄漏率低于 3%/d 时,CENTER 非居住区边界处个人剂量可满足无场外应急接受准则的要求,但整个事故期间(0~30 d)个人剂量已很接近 10 mSv 的最大个人累计剂量限值,安全裕度较小。因此,在保证无需采取场外应急干预措施的前提下,兼顾考虑工程实施可行性与经济性,选择密闭厂房的泄漏率为 2%/d。

2.2 应急通风量对辐射后果的影响

假定严重事故初始时刻应急通风系统即已开启,整个事故期间应急通风系统不关闭,且密闭厂房低架泄漏率恒定为 2%/d。在应急通风量分别为 68、135、271、541、677 m³/h(对应高架泄漏

率分别为 5%/d、10%/d、20%/d、40%/d、50%/d) 时, CENTER 非居住区边界处 0~8 h、0~30 d 个人剂量计算值见表 2。

表 2 不同应急通风量 CENTER 非居住区边界处个人剂量
Table 2 Individual Effective Dose under Different Air Exhaust Volumes at the Boundary of CENTER Exclusion Area

应急通风量/m ³ ·h ⁻¹	全身有效剂量/mSv	
	0~8 h	0~30 d
68	2.17	5.41
135	2.18	4.75
271	2.21	4.07
541	2.28	3.53
677	2.31	3.40

由表 2 可知, 当应急通风量增大时, 事故短期 (0~8 h) 内非居住区边界处个人剂量增大, 且都比仅以 2%/d 低架泄漏导致的短期个人剂量 (2.15 mSv) 高。产生该现象的主要原因是, 事故短期内以“低架泄漏+应急通风量”方式排放的低架源项与仅以“2%/d 低架泄漏”方式排放的源项相差较小, 而由应急通风系统高架排放的放射性物质所致个人剂量增加较为明显。如以“低架泄漏+应急通风量为 677 m³/h”方式排放的低架源项为 6.29×10^{13} Bq, 与以“2%/d 低架泄漏”方式排放的源项 (6.75×10^{13} Bq) 相比, 仅降低了不到 7%, 其所致个人剂量降低较小。此时叠加由应急通风系统高架排放的放射性物质所致个人剂量, 最终使得事故短期内个人剂量增加。

当应急通风量增大时, 事故长期 (0~30 d) 非居住区边界个人剂量降低, 且都比仅以 2%/d 低架泄漏导致的长期个人剂量 (6.63 mSv) 低。一方面, 在整个事故期间低架泄漏的源项降低较多, 如以“低架泄漏+应急通风量为 68 m³/h”方式排放的低架源项为 4.22×10^{14} Bq, 比 2%/d 低架泄漏的源项 (5.35×10^{14} Bq) 降低 20% 以上。另一方面, 虽然由应急通风系统排放的高架源项大幅增加 (达到 1.71×10^{15} Bq), 但 0~30 d 非居住区边界处高架弥散因子 (7.34×10^{-7} s/m³) 远小于低架弥散因子 (1.69×10^{-4} s/m³), 仅约为低架弥散因子的 0.43%, 从而使得高架排放源项所致个人剂量很小 (约 3.56×10^{-2} mSv)。此外, 由于碘在整个事故期间对个人剂量的贡献较大 (高达 70% 以上), 而当应急通风系统开启时, 其中的碘吸附过滤器可对放射性碘进行吸附过滤, 其

去除率通常在 95% 以上, 从而使得个人剂量进一步降低。

此外, 与单纯的低架泄漏相比, 高架泄漏参与排放的非居住区边界处个人剂量更低, 但若考虑到规划限制区边界处公众集体剂量将大幅增加的情况, 则在严重事故期间应急通风系统不应尽早开启。如, 当应急通风系统以排风量 677 m³/h 开启时, CENTER 堆规划限制区边界 (距反应堆 5000 m) 处个人剂量短时间 (2 h) 内明显上升, 由 7.38×10^{-2} mSv (2%/d 低架泄漏) 增长到 2.01×10^{-1} mSv。根据人口调查, 规划限制区内居住人口约在 20000 人以上, 公众集体剂量在短时间会大幅增加, 这不符合“合理可行尽量低”的辐射防护最优化原则^[5]。因此, 在综合考虑 2%/d 低架泄漏可满足无场外应急要求的前提下, 严重事故初期不应开启应急通风系统, 以保证规划限制区边界处公众免受不必要的剂量。

2.3 密闭时间对辐射后果的影响

选定密闭厂房低架泄漏率 2%/d、应急通风量 650 m³/h, 应急通风系统在关闭 0 h、1 h、2 h、4 h、8 h、1 d、2 d、4 d、7 d、15 d、30 d 后开启并持续至事故末期, CENTER 堆非居住区及规划限制区边界处 0~8 h 个人剂量分布见表 3; CENTER 堆非居住区及规划限制区边界处 0~30 d 个人剂量分布见表 4。

表 3 不同密闭时间下非居住区及规划限制区边界处 0~8 h 个人剂量

Table 3 Individual Effective Dose of 0~8 h under Different Sealed Times at the Boundary of Exclusion Area and Planning Restricted Area

密闭时间	非居住区个人剂量/mSv	规划限制区个人剂量/mSv
0 h	2.30	0.328
1 h	2.23	0.255
2 h	2.19	0.212
4 h	2.18	0.181
8 h	2.15	0.148
1 d	2.15	0.148
2 d	2.15	0.148
4 d	2.15	0.148
7 d	2.15	0.148
15 d	2.15	0.148
30 d	2.15	0.148

由表 3 可知, 随着密闭时间增加, 非居住区及规划限制区边界处 0~8 h 个人剂量逐渐降低。产生该现象的主要原因是事故初期关键核素为

表4 不同密闭时间下非居住区及规划限制区边界处
0~30 d 个人剂量

Table 4 Individual Effective Dose Curves of 0~30 d under
Different Sealed Times at the Boundary of
Exclusion Area and Planning Restricted Area

密闭时间	非居住区个人剂量/mSv	规划限制区个人剂量/mSv
0 h	3.42	0.408
1 h	3.38	0.337
2 h	3.36	0.295
4 h	3.40	0.267
8 h	3.47	0.242
1 d	3.75	0.243
2 d	4.02	0.258
4 d	4.52	0.277
7 d	5.08	0.299
15 d	6.04	0.336
30 d	6.63	0.359

^{88}Kr , 其半衰期较短(约 171.6 min), 密闭时间越长, 惰性气体衰变越多, 向环境释放源项越少, 因此事故短期内边界处个人剂量降低。此现象进一步表明, 按照辐射防护最优化原则, 严重事故初期不应立即开启应急通风系统。

由表 4 可知, 当密闭时间增加时, 非居住区及规划限制区边界处 0~30 d 个人剂量呈现出“先降低后升高”的趋势, 非居住区边界处个人剂量在密闭 2 h 时达到最低值, 规划限制区边界处公众个人剂量在密闭 8 h 时达到最低值。

综上, 当密闭 8 h 时开启应急通风系统, 非居住区边界处 0~8 h 个人剂量为 2.15 mSv, 0~30 d 个人剂量为 3.47 mSv, 可不采取场外干预措施。综上, 应采取“严重事故初期密闭, 8 h 后开启应急通风系统”的排风方案。

3 结 论

本文从泄漏率、应急通风量、密闭时间等几

个方面对 CENTER 堆严重事故的辐射后果进行了分析和讨论, 得到以下结论:

(1) 密闭厂房泄漏率在 3%/d 以下时可保证无需采取场外应急干预措施。综合考虑个人剂量裕量、工程实施可行性与经济性等因素, 密闭厂房泄漏率采用 2%/d。

(2) 随着应急通风量增加, 非居住区边界处个人剂量在事故短期内升高, 在整个事故期间降低。

(3) 随着应急通风量增加, 事故短期内规划限制区边界处公众集体剂量大幅增加。因此, 严重事故初期不应开启应急通风系统, 以保证规划限制区边界处公众免受不必要的剂量。

(4) 当密闭时间增加时, 非居住区和规划限制区边界处 0~30 d 个人剂量呈现先降低后升高的趋势, 并分别在密闭 2 h 和 8 h 时达到最低值。根据辐射防护最优化原则, 排风方式应采取“严重事故初期密闭, 8 h 后开启应急通风系统”的方案。

参考文献:

- [1] 环境保护部. 核动力厂环境辐射防护规定: GB 6249-2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011: 3.
- [2] 张海霞, 刘森林, 姜希文. 中国先进研究堆严重事故辐射后果研究[J]. 原子能科学技术, 2007, 41(3): 331-334.
- [3] 彭常宏. CENTER 工程试验堆功率运行工况概率安全分析报告[R]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [4] 张勇. CENTER 堆初步安全分析报告[R]. 成都: 中国核动力研究设计院, 2013.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局. 电离辐射防护与辐射源安全基本标准: GB 18871-2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 4.

(责任编辑: 周 茂)