

Study on the Influence of MSLB Accident on Main Control Room Dose

Dawei Sun, Nan Pan, Shanshan Zhang

Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute, Shanghai
Email: sundw@snerdi.com.cn

Received: Sep. 24th, 2015; accepted: Oct. 11th, 2015; published: Oct. 20th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In this paper, main steam line break (MSLB) accident dose assessment method on AP1000 is elaborated, and three types of radiation source term analysis models are expounded, involving the primary coolant initial activity release, secondary coolant initial activity release and iodine spike release. Based on the AP1000 coastal site, the main control room (MCR) personal doses are evaluated, during operation of emergency habitability system (VES) mode and nuclear island nonradioactive ventilation system (VBS) supplemental air filtration mode, respectively. All the above results can meet the requirement of HAD 002/01-2010, and the main control room has good habitability. Meanwhile, detailed parameter sensitivity analysis is performed for MCR dose based on VES mode. Research results have shown that the initial secondary iodine and alkali metals release makes the largest contribution to MCR dose, and the MCR dose mainly results from the VBS normal operation mode activity introduction during the period of 0.052~4 h. The blowdown period of SG, beginning time of VES mode, and recirculation flow are the sensitive parameters to MCR dose, but the in-leakage rate and auxiliary fan flow are insensitive parameters. These research conclusions could provide necessary theory reference to MCR design optimization.

Keywords

MSLB, Main Control Room, Habitability, Sensitivity Analysis

MSLB事故对主控制室剂量影响研究

孙大威, 潘楠, 张姗姗

上海核工程研究设计院, 上海

Email: sundw@snerdi.com.cn

收稿日期: 2015年9月24日; 录用日期: 2015年10月11日; 发布日期: 2015年10月20日

摘要

本文深入的阐述了AP1000主蒸汽管道破裂事故(MSLB)剂量分析基本方法,介绍了一回路、二回路初始放射性释放及碘尖峰释放三种方式的源项计算模型。以AP1000滨海厂址为例,分别评估了MSLB事故后应急可居留系统(VES)模式和非放射性通风系统(VBS)新风过滤模式投入情况下主控制室(MCR)内工作人员的剂量,其剂量结果均可满足HAD 002/01-2010限值要求,事故后主控制室具有良好的可居留性。同时,针对VES投入情况下主控制室剂量影响参数,开展了详细的敏感性分析。研究表明,二回路初始存在的碘及碱金属对剂量贡献最大;MCR剂量主要来自于0.052~4 h时间段,由VBS正常通风引入的放射性所产生;破损SG喷放时间、VES模式开始时间、MCR内循环风量为剂量敏感参数,MCR内渗透率、辅助风机风量为剂量不敏感参数。相关研究结论可为优化主控制室设计提供必要的理论参考。

关键词

MSLB, 主控制室, 可居留性, 敏感性分析

1. 引言

主蒸汽管道大破口是“一次侧热输出增加”这类事故中最严重的反应堆冷却剂降温瞬态,而发生在安全壳外的主蒸汽管道破裂事故(MSLB)将旁通安全壳这一屏障,放射性物质可以通过破口直接释放到环境中。MSLB对核电厂安全具有重要影响,在环境影响评价及安全分析报告中均需进行相应评价。

针对最极限的安全壳外主蒸汽管道双端断裂事故,本文结合国内某AP1000滨海厂址具体特征开展了事故放射性后果评价,全面评价了该事故对主控制室工作人员的剂量影响。同时,本文深入研究确定了对剂量起主导作用的放射源、剂量主要产生时段,并且识别出了剂量影响关键参数,为主控制室设计优化指明了方向。

2. 事故描述

MSLB事故将引起二回路蒸汽从破口释放,起初在短时间内蒸汽流量快速增加,而后,随着蒸汽压力下降,蒸汽流量逐渐减小。由于一次侧排出热量过多导致反应堆冷却剂系统降温降压,反应堆紧急停堆。事故过程中,破损主蒸汽管道及其启动给水将被隔离,反应堆由完好回路或者非能动余热排出热交换器冷却。事故放射性后果分析中保守的假设破损回路的蒸汽发生器(SG)被蒸干,从一回路泄漏到该破损回路SG的全部放射性通过破口直接排放入环境。完好回路SG不会裸露,大部分放射性会滞留在二次侧。为了简化分析,也保守假设其初始放射性全部释放。

对于主蒸汽管道破裂事故剂量影响评价,通常考虑两种独立工况:

- 工况1为MSLB叠加事故前碘尖峰释放;
- 工况2为MSLB引起事故并发碘尖峰释放。

放射性产生途径可归纳为如下三方面:

- 通过SG传热管泄漏到二次侧的RCS初始碘、碱金属、惰性气体;
- 二回路初始存在的碘、碱金属;

- 事故前碘尖峰释放(适用工况 1)或事故并发碘尖峰释放(适用工况 2)。

3. 源项分析模型

3.1. RCS 初始放射性释放

事故发生后, RCS 中放射性核素将伴随事故进程而有所损耗, 主要包括核素自身衰变以及向二次侧泄漏损耗, 则其活度为:

$$C_i(t) = C_{0,i} \times e^{-\lambda_i \times t} \quad (1)$$

式中, $C_i(t)$ 为事故发生后 t 时刻 RCS 中核素 i 的活度浓度, Bq/g; $C_{0,i}$ 为事故发生初始时刻 RCS 中核素 i 的活度浓度, Bq/g; $\lambda_i = \lambda_{d,i} + 2F_1/m_1$, $\lambda_{d,i}$ 为核素 i 的衰变常数, h^{-1} ; F_1 为每台 SG 一次侧向二次侧泄漏率, g/h; m_1 为 RCS 冷却剂质量, g。

通过蒸汽发生器由一次侧泄漏到二次侧, 并进一步释放到环境中的核素活度微分方程如下:

$$\frac{dQ_{1,i}(t)}{dt} = C_i(t) \times (F_l + P_{c,i} \times F_l) = C_{0,i} \times (F_l + P_{c,i} \times F_l) \times e^{-\lambda_i \times t} \quad (2)$$

求解上述微分方程可以计算得到下式:

$$Q_{1,i}(t) = \frac{C_{0,i} \times (F_l + P_{c,i} \times F_l)}{\lambda_i} \times (1 - e^{-\lambda_i \times t}) \quad (3)$$

式中, $Q_{1,i}(t)$ 为 RCS 中初始核素 i 在 t 时刻释放到环境的活度, Bq; $P_{c,i}$ 为完好回路 SG 汽水分配系数(破损回路保守忽略稀释及分配效应), 只有碘及碱金属需要考虑该汽水分配效应, 惰性气体假设不滞留而直接释放; 其余参数物理意义同上。

3.2. 二回路初始放射性释放

二回路冷却剂中主要包括初始存在的碘及碱金属, 伴随事故进程释放到环境的源项如下式:

$$Q_{2,i}(t) = \begin{cases} (B_{0,i} \times m_2 / t_1 + B_{0,i} \times m_2 / t_2) \times t, & \text{当 } t \leq t_1 \text{ 时;} \\ B_{0,i} \times m_2 + (B_{0,i} \times m_2 / t_2) \times t, & \text{当 } t_1 \leq t \leq t_2 \text{ 时;} \\ 2B_{0,i} \times m_2, & \text{当 } t \geq t_2 \text{ 时。} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $Q_{2,i}(t)$ 为二回路中初始核素 i 在 t 时刻释放到环境的活度, Bq; $B_{0,i}$ 为事故发生初始时刻二回路中核素 i 的活度浓度, Bq/g; m_2 为每台 SG 二回路的冷却剂质量, g; t_1 为破损回路 SG 喷放持续时间, h; t_2 为完好回路 SG 释放持续时间, h。

3.3. 碘尖峰释放

1) 事故前碘尖峰释放

事故发生前的功率、压力等瞬态作用, 可以使存在破损的燃料棒向反应堆冷却剂的碘释放速率短时间内快速增加, 而产生一种尖峰释放现象, 即事故前碘尖峰释放。通常, 假设事故前碘尖峰导致一回路冷却剂碘活度浓度达到公式(1) $C_{0,i}$ 的 60 倍 [1]。

2) 事故并发碘尖峰释放

与事故前碘尖峰有所不同, 事故并发碘尖峰是由于事故发生过程的瞬态作用而产生的尖峰释放现象。通过并发碘尖峰释放到一回路冷却剂内核素活度微分方程为:

$$\frac{dA_i(t)}{dt} = R_i - A_i \times \lambda_i \quad (5)$$

式中, $A_i(t)$ 为 t 时刻通过并发碘尖峰释放到 RCS 内的碘核素 i 活度, Bq; R_i 为并发碘尖峰向 RCS 释放率, Bq/h, 其余参数物理意义同上。

求解上述微分方程得到下式:

$$A_i(t) = \frac{R_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (6)$$

假设泄漏到破损回路 SG 的碘不滞留全部直接释放, 而泄漏到完好回路 SG 的碘需要考虑汽水分配效应, 则释放到环境碘活度微分方程为:

$$\frac{dQ_{3,i}(t)}{dt} = \frac{(F_l + P_{c,i} \times F_l)}{m_1} \times A_i(t) = \frac{(F_l + P_{c,i} \times F_l)}{m_1} \times \frac{R_i}{\lambda_i} (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (7)$$

求解上述微分方程得到下式:

$$Q_{3,i}(t) = \frac{(F_l + P_{c,i} \times F_l) \times R_i}{m_1 \times \lambda_i} \times \left(t - \frac{1 - e^{-\lambda_i t}}{\lambda_i} \right) \quad (8)$$

式中, $Q_{3,i}(t)$ 为事故后 t 时刻通过并发碘尖峰释放到环境的碘核素 i 活度, Bq; 其余参数物理意义同上。

4. 主控制室剂量评价

4.1. 通风模式

主控制室剂量计算时, 分别考虑两种通风模式: 应急可居留系统(VES)通风模式和非放射性通风系统(VBS)新风过滤模式。

VES 模式分析中, 假设通风系统初始工作在 VBS 正常运行模式。当惰性气体探测器发出“高”报信号后, 保守假设非安全有关的 VBS 新风过滤模式未被触发投入。主控制室 VBS 正常运行模式将持续运行, 直至放射性粒子探测器或碘探测器发出“高”报信号后, 安全有关的 VES 模式被触发投入使用。本文分析了该 VES 模式情况下主控制室剂量。

同时, 按照纵深防御的原则, 当惰性气体探测器发出“高”报后, 非安全有关的 VBS 新风过滤模式也有可能被触发投入, 以保护主控制室人员。因此, 本文也评估了从 VBS 正常运行模式切换到新风过滤模式时主控制室的剂量(此分析不需要切换到 VES 模式)。

4.2. 评价模型

1) MCR 内核素活度

VBS 新风过滤模式情况下, 主控制室内放射性核素活度可由下式计算:

$$\frac{dA_{c,i}}{dt} = Q_i \times (\chi/Q)_k \times [F_1 \times (1 - \eta_i) + F_3] - \lambda_{d,i} \times A_{c,i} - \frac{F_2 \times \eta_i}{V} \times A_{c,i} - \frac{F_4}{V} \times A_{c,i} \quad (9)$$

式中, $A_{c,i}$ 为事故后各时刻主控制室内核素 i 活度, Bq; Q_i 为单位时间内向环境释放的核素 i 活度, Bq/s; $(\chi/Q)_k$ 为 k 时段大气弥散因子, s/m^3 ; F_1 为新风流量, m^3/h ; F_2 为内循环流量, m^3/h ; F_3 为非过滤渗入率, m^3/h ; F_4 为主控制室向环境排风流量, m^3/h ; η_i 为过滤器对核素 i 过滤效率; $\lambda_{d,i}$ 为核素 i 衰变常数, h^{-1} ; V 为主控制室容积, m^3 。

上式中, 放射性通过新风及内渗漏进入主控制室, 在主控制室内考虑衰减、内循环过滤、排风等衰

减效应。通过求解该微分方程可以计算主控制室在事故后各时刻放射性核素活度，进一步对时间进行积分可得到累积活度，除以主控制室容积即可得到时间积分浓度。

对于主控制室 VES 模式，已经切断外界送风，故需将公式(9)中的新风流量 $F_1(1-\eta_i)$ 项去掉。

2) MCR 内剂量

主控制室内工作人员有效剂量包括内照射有效剂量及外照射有效剂量两部分总和。主控制室是一个有限大的空间，相比于半无限大烟羽外照射模型，主控制室工作人员外照射有效剂量需要进行几何修正。同时，剂量评价需要考虑事故后 30 天内接受剂量，时间跨度比较长，需要引入居留时间份额，即居留因子。

有效剂量计算公式如下：

$$D_E = D_{EDE} + D_{CEDE} = \frac{1}{GF} \times \sum_i DCF_{1,i} \times \sum_j (IAR)_{i,j} \times O_j + \sum_i DCF_{2,i} \times \sum_j (IAR)_{i,j} \times (BR)_j \times O_j \quad (10)$$

式中， D_E 为有效剂量，Sv； D_{EDE} 为外照射有效剂量，Sv； D_{CEDE} 为内照射有效剂量，Sv； GF 为主控制室几何修正因子 [1]， $GF = 351.6/V^{0.338}$ ； $DCF_{1,i}$ 为核素 i 外照射有效剂量转换因子 [2]， $Sv \cdot m^3/Bq \cdot s$ ； $DCF_{2,i}$ 为核素 i 内照射有效剂量转换因子 [3]， Sv/Bq ； $(IAR)_{i,j}$ 为在时间段 j 内主控制室累积的核素 i 活度， $Bq \cdot s/m^3$ ； BR_j 为时间段 j 内工作人员的呼吸率 [1]， m^3/s ； O_j 为时间段 j 内工作人员在主控制室内的居留因子 [1]。

4.3. 剂量结果

表 1 计算给出了两种工况下主控制室工作人员接受的剂量结果，工况 1 发生 30 天后 VES 模式及 VBS 新风过滤模式下有效剂量分别为 15.38 mSv、4.72 mSv，甲状腺剂量分别为 288.49 mSv、135.11 mSv；工况 2 发生 30 天后 VES 模式及 VBS 新风过滤模式下有效剂量分别为 16.39 mSv、14.62 mSv，甲状腺剂量分别为 322.22 mSv、453.94 mSv，剂量结果均满足 HAD 002/01-2010 [4]规定的剂量限值要求(有效剂量限值 50 mSv、甲状腺剂量限值 500 mSv)。

5. 敏感性分析

鉴于 AP1000 核电厂主控制室 VBS 通风模式为非安全级，仅作为纵深防御手段，因此本文主要以 VES 模式为基础开展关键参数敏感性分析。

5.1. 主导放射源

MSLB 事故后，一回路、二回路冷却剂中初始存在的放射性以及碘尖峰释放的放射性将通过大气释放阀或 SG 破口释放到环境。为了定量评估上述放射源的相对贡献、确定主导放射源，本文针对 MSLB 引起并发碘尖峰工况，定量的评估了各类放射源对主控制室有效剂量的贡献(针对 VES 模式情况)，具体剂量结果见图 1。结果表明，二回路初始存在的碘及碱金属剂量贡献最大(分别为 8.17 mSv 及 6.86 mSv)，并发碘尖峰释放的碘也具有一定贡献(1.34 mSv)，一回路冷却剂初始存在放射性贡献最小(小于 0.01 mSv)。

5.2. 各时间段接受剂量

事故发生后初始 0.052 h，主控制室工作在 VBS 正常通风模式下；之后启动 VES 模式，由灌装压缩空气提供送风，并且由非能动空气过滤管线提供内循环过滤，整个过程持续到 72 h；空气耗光后打开房门由辅助风机进行送风，一直持续到厂外供气恢复(事故后 168 h)。为了定量的评估事故后主控制室内剂量变化情况，图 2 给出了各时段所获得剂量。结果表明：事故后主控制室内剂量主要来自于 0.052~4 h 时间段，主要是 VBS 正常通风引入的放射性产生的剂量；72~168 h，虽然主控制室敞开门，但事故后放射性释放已经结束，该时段剂量贡献非常小。

Table 1. Main control room doses
表 1. 主控制室剂量

工况	VES 模式		VBS 新风过滤模式	
	有效剂量(mSv)	甲状腺剂量(mSv)	有效剂量(mSv)	甲状腺剂量(mSv)
工况 1	15.38	288.49	4.72	135.11
工况 2	16.39	322.22	14.62	453.94

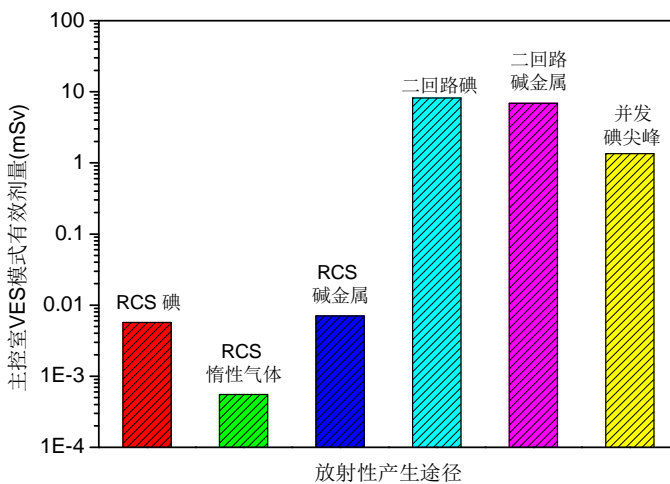


Figure 1. Dose contributions of each source to MCR

图 1. 各种放射源对主控制室剂量贡献

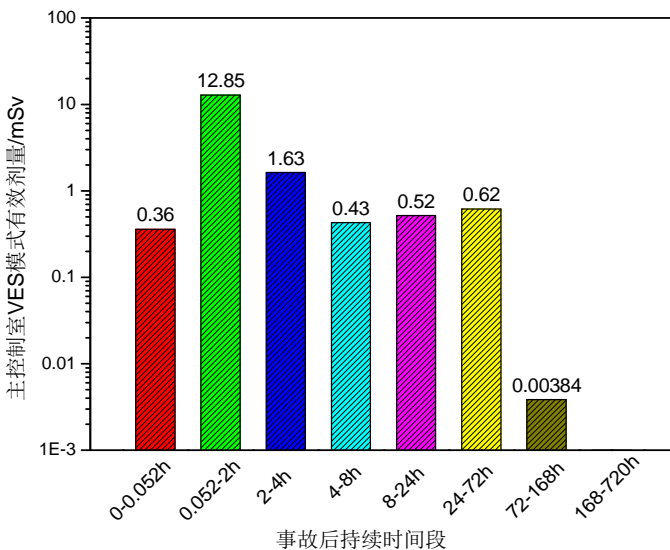


Figure 2. MCR doses come from each time period after the accident

图 2. 事故后各时段产生的主控制室剂量

5.3. 关键参数敏感性分析

敏感性分析是指从定量分析的角度研究有关因素发生某种变化对某一个或一组关键指标影响程度的一种不确定分析技术。敏感性因素一般可选择主要参数进行分析。若某参数的小幅度变化能导致关键指

标的较大变化，则称此参数为敏感性因素，反之则称其为非敏感性因素。

本文用敏感性系数来评价主要参数对主控制室有效剂量的影响程度。敏感性系数计算公式如下：

$$S_{DF} = (\Delta D_E / D_E) / (\Delta F / F)$$

式中， S_{DF} 为敏感性系数； $\Delta D_E / D_E$ 为有效剂量结果的变化率； $\Delta F / F$ 为不确定因素的变化率。

当 $S_{DF} > 0$ 时，表示剂量结果与不确定性因素同方向变化；当 $S_{DF} < 0$ 时，表示剂量结果与不确定性因素反方向变化。 $|S_{DF}|$ 越大，表明剂量结果 D_E 对于不确定性因素 F 越敏感；反之，则不敏感。

针对 MSLB 事故破损 SG 喷放时间、VES 模式投用时间、MCR 内渗透风量、内循环风量、辅助风机风量等，本文计算给出了主控制室有效剂量对这些参数的敏感性系数，具体见 表 2。上述参数基准值依次为：600 s、188 s、25.5 m³/h、1020 m³/h、2890 m³/h；敏感性系数针对变化±33%、±67%、±100%情况进行评估。结果表明：

- 喷放时间直接决定二回路初始放射性释放速率，喷放时间越短，主控制室剂量越大，并且越敏感；
- VES 模式投用时间决定进入主控制室内放射性量，投用时间越晚，主控制室剂量越大，并且敏感性系数几乎为常值；
- 内渗透率对主控制室剂量影响不大，为不敏感参数；
- 内循环风量直接决定对进入主控制室内放射性的循环去除能力，内循环风量越小，主控制室剂量越大，并且越敏感；
- MSLB 事故在 72 h 内放射性释放结束，剂量主要是在辅助风机投用之前产生，辅助风机风量对主控制室剂量几乎无影响。

按照传统观点，主控制室 VES 模式启动情况下，内渗透是放射性进入主控制室的关键途径，其取值应对主控制室剂量产生较大影响，这与内渗透率敏感性分析结论存在一定差异。为了解释该现象，本文进一步研究了不同内渗透率情况下主控制室内 DE.I-131 放射性水平随时间的动态变化，具体如 图 3 所示。

Table 2. Sensitivity coefficient of key parameters
表 2. 关键参数敏感性系数

		变化幅度					
		-100%	-67%	-33%	+33%	+67%	+100%
喷放时间变化	喷放时间(s)	0	200	400	800	1000	1200
	有效剂量(mSv)	54.52	49.03	22.72	12.68	10.55	9.15
	敏感性系数	-2.33	-2.99	-1.16	-0.68	-0.53	-0.44
VES 模式投用时间	投用时间(s)	0	63	126	251	314	377
	有效剂量(mSv)	1.59	4.69	10.56	22.22	28.08	33.91
	敏感性系数	0.90	1.07	1.07	1.07	1.07	1.07
MCR 内渗透变化	内渗透率(m ³ /h)	0.0	8.5	17.0	34.0	42.5	51.0
	有效剂量(mSv)	14.97	15.45	15.93	16.85	17.30	17.74
	敏感性系数	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
MCR 内循环风量变化	风量(m ³ /h)	0	337	683	1357	1703	2040
	有效剂量(mSv)	75.34	38.76	22.98	12.77	10.49	8.92
	敏感性系数	-3.60	-2.05	-1.21	-0.66	-0.54	-0.46
辅助风机风量变化	风量(m ³ /h)	0	954	1936	3844	4826	5780
	有效剂量(mSv)	16.68	16.39	16.39	16.39	16.39	16.39
	敏感性系数	-0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

结果表明, 事故后初始 4 h, 内渗透率对主控室内放射性水平无明显影响。这是因为 VES 模式启用前送入 MCR 的放射性远大于内渗透漏入的放射性, 即使 VBS 正常通风模式被隔离, 不再有放射性送入, 但滞留的放射性也占据主导。但随着 VES 内循环过滤器对 MCR 内放射性的循环过滤, 这部分滞留的放射性呈逐渐减少趋势。直到 4 h 后, 内渗透进入 MCR 的放射性逐渐超过了原来滞留的放射性, 则此时刻之后内渗透率越大 MCR 内放射性越大。而图 2 分析结果表明, VES 模式情况下 MCR 剂量基本上在前 4 h 内产生, 而内渗透率对 MCR 剂量产生影响是在事故发生 4 h 后, 故最终 MCR 剂量对其不敏感。

上述分析表明内循环风量对 MCR 有效剂量影响较大, 为了进一步反映整个事故持续过程中的具体影响, 图 4 给出了不同内循环风量情况下 MCR 内放射性动态变化。结果表明, 内循环机制启用后(0.052 h), 将显著降低 MCR 内放射性水平; 同时内循环风量越大, 放射性过滤效果越明显。

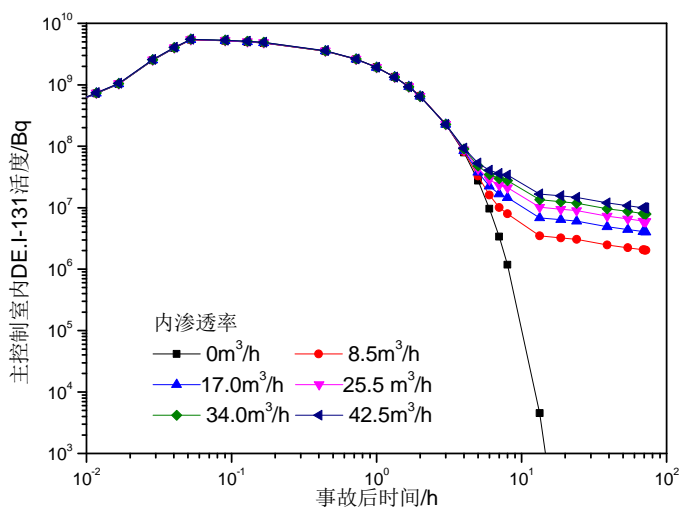


Figure 3. MCR activity based on various inleakage rate

图 3. 不同内渗透率情况下 MCR 内放射性水平

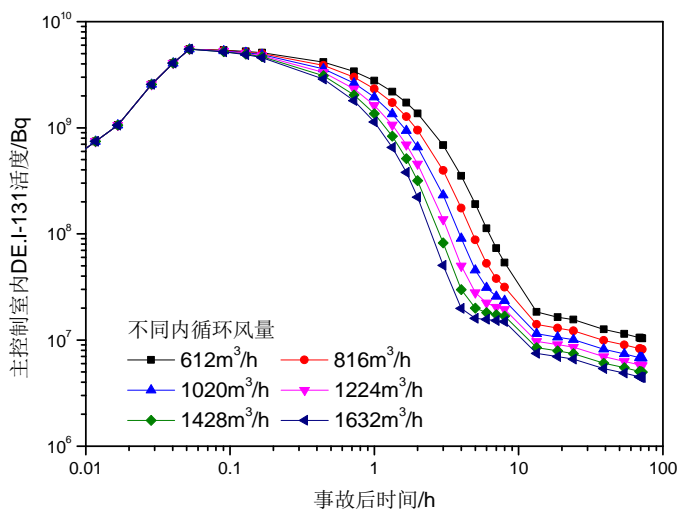


Figure 4. MCR activity based on various recirculation flow

图 4. 不同内循环风量情况下 MCR 内放射性水平

6. 结论

基于 AP1000 滨海厂址, 本文开展了 MSLB 事故对主控制室剂量影响研究, 并进行了全面的敏感性分析(针对叠加事故并发碘尖峰工况、主控制室处于 VES 通风模式), 得到结论如下:

1) MSLB 事故后主控制室开启任何一种通风过滤模式, 均能够对工作人员提供一定的防护, 有效剂量均可以满足 HAD 002/01-2010 规定的 50 mSv 剂量限值要求。

2) 对于 MSLB 事故, 源项包括来自于一回路、二回路中初始存在的放射性, 以及碘尖峰释放的放射性, 主控制室剂量主要取决于二回路放射性的释放。

3) 对于 MSLB 事故, 主控制室剂量主要是在前 4 h 时段产生, 72 h 后门敞开阶段将无显著剂量贡献。

4) 由敏感性分析可知, 主控制室剂量对二回路冷却剂喷放时间、内循环风量、VES 模式投用时间比较敏感, 而内渗透率及辅助风机风量为不敏感参数。

参考文献 (References)

- [1] US Nuclear Regulatory Commission (2000) Alternative radiological source terms for evaluating design basis accidents at nuclear power reactors. RG 1.183, US Nuclear Regulatory Commission, Washington DC.
- [2] Eckerman, K.F. and Jeffrey, C.R. (1993) External exposure to radionuclides in air, water and soil. United States Environmental Protection Agency, Washington DC, 58-73.
- [3] Eckerman, K.F. and Wolbarst, A.B. (1988) Limiting values of radionuclide intake and air concentration and dose conversion factors for inhalation, submersion, and ingestion. United States Environmental Protection Agency, Washington DC, 121-153.
- [4] 国家核安全局 (2010) 核动力厂营运单位的应急准备和应急响应. HAD 002/01.