

核电厂场外应急撤离研究

郑剑香, 俞培钊

厦门大学能源学院, 福建 厦门

收稿日期: 2022年8月1日; 录用日期: 2022年9月1日; 发布日期: 2022年9月9日

摘 要

本文从对核电厂场外应急撤离的现状和存在的问题进行探讨, 分析了影响核电厂应急撤离的因素, 并依据撤离模型计算分析公众撤离时间和所受辐射剂量值, 其结果为应急撤离预案制定提供建议参考。

关键词

核应急, 核事故撤离, 撤离路径

Study on Off-Site Emergency Evacuation of Nuclear Power Plant

Jianxiang Zheng, Peizhao Yu

School of Energy, Xiamen University, Xiamen Fujian

Received: Aug. 1st, 2022; accepted: Sep. 1st, 2022; published: Sep. 9th, 2022

Abstract

The paper discusses the current situation and existing problems of off-site emergency evacuation of nuclear power plants, analyzes the factors affecting the emergency evacuation of nuclear power plants, and calculates and analyzes the public evacuation time and radiation dose value according to the evacuation model. The results provide suggestions and references for nuclear accident emergency evacuation plan making.

Keywords

Nuclear Emergency, Nuclear Accident Evacuation, Evacuation Path



1. 引言

核电厂场外应急撤离能力是核事故应急预案制定考虑的重要因素。目前的核事故应急预案很少以吸收辐射剂量为评价依据制定。核电厂烟羽应急计划区内公众的撤离受气象条件、撤离点数量及区域布设、道路通行能力、以及撤离人数等因素影响。通过分析核电厂气象数据,划出“锁孔”撤离区设置不同的撤离路径,依据撤离模型计算公众撤离时间和个人辐射剂量值,计算结果表明,不同的撤离路径的撤离时间和个人吸收辐射剂量值不同。最少的辐射剂量值会是优先考虑的撤离预案。因此,制定应急预案时建议应该考虑不同气象条件、撤离路径下的不同撤离情景的撤离后果。在事故发生时,做到能结合实时气象、路网条件,给出最优的撤离路径和执行策略。

2. 核电厂场外应急撤离现状

核电厂场外应急撤离能力,是核电厂选址、应急预案制定以及应急响应行动的实施需要考虑的重要因素。合理的撤离策略也是场外应急响应有效实施的重要保证[1]。美国 Shoreham 核电厂由于应急计划区被认为在事故中不能有效撤离,未能获取运行执照[2]。宁德核电站在制定应急撤离路线时,基于法规要求,设计两条道路以改善核电厂应急撤离的条件[3]。

事故发生后进入启动场外应急状态,根据应急预案规定,应急计划区内每个参与撤离的村庄都有相应撤离点和拟转移安置点。撤离时间越短,撤离公众在室外暴露的时间越少,从而可降低吸收辐射剂量的风险,是现有核事故应急撤离的指导思想。如果撤离路径方向与放射性烟羽扩散方向接近时,最短撤离时间和最小吸收剂量并不是完全对应的。目前,应急预案很少以吸收辐射剂量为评价依据制定。应急计划区的公众采用的是预先制定的背对核电厂方向的撤离路径撤离。

核事故发生时气象条件会影响放射性烟羽扩散。在实时气象条件下,由于风向的局限特点,核电厂周边居民在不同方位的放射性物质照射是不同的。风速和风向会影响放射性物质扩散。如果沿着下风向进行撤离,可能会造成严重的辐射后果,这将与应急目标背道而驰。

美国核管会提出将撤离区域缩小为电厂周围 3.2 Km 内、下风向扇区及两侧扇区 8 Km 内的人员撤离,即“锁孔”撤离区。相比与背对核电厂方向撤离,“锁孔”撤离策略是一种更有效的撤离策略[4]。

3. 核电厂场外应急撤离模型

为了实现对核电厂场外应急撤离能力的评估,开发了一套基于动态放射性剂量的核事故撤离模型和软件。可计算不同气象条件下的放射性物质分布;模型中提出了一种优化的 A*算法,目标函数结合考虑最小剂量和最短路径,根据气象条件找出最佳撤离路径,并能计算不同撤离路径下的照射剂量值。在对撤离进行模拟时,可以根据历史气象数据,通过优化的 A*路径规划算法,可为核电厂制定应急预案的撤离路径规划提供参考建议。

基于动态放射性剂量计算的核事故撤离模型共包括五个模块:气象数据模块、地图模块、大气扩散模块、剂量模块和撤离模块。见图 1 所示。

气象数据模块作为大气扩散模块的一个前置接口,用于形成不同时刻的气象信息(风向、风速和降雨强度等数据)或不同气象序列,以作为大气扩散模块的输入。

地图模块将包含核电厂及周围地区的地图, 读取主要通行道路及其连接关系, 构建路网模型。此外, 地图模块为大气扩散模块的观测点网格、撤离模块的路网的支撑, 并实现放射性物质的浓度分布和撤离路径的可视化。

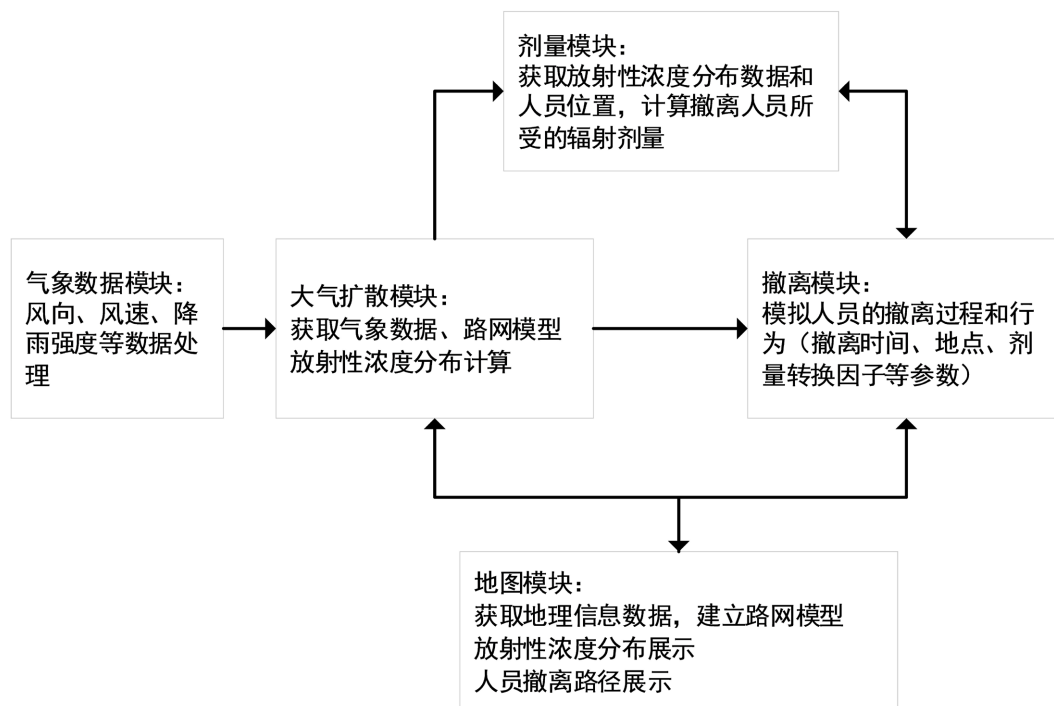


Figure 1. Evacuation model for off-site emergency evacuation

图 1. 核电厂场外应急撤离模型

大气扩散模块包含基于气象条件的大气扩散模型, 根据事故源项和气象数据条件计算放射性物质随时间在地图上不同位置的浓度分布。本模型中, 大气扩散模型采用一种拉格朗日模型 *Integral Puff* 模型[5]。

剂量模块包含剂量转换计算模型, 根据大气扩散模块计算出的浓度分布, 计算人员到达区域内任何一处的放射性剂量。

撤离模型包括两种撤离模式, 一种是固定路径撤离模式, 用于评估撤离路径的放射性后果; 另一种是路径规划撤离模式, 该模式基于改进的 *A** 算法, 结合大气扩散模型和剂量模型寻找实时气象条件下的最优撤离路径。

在模型计算时, 首先, 初始化所有参数。大气扩散模块从气象模块获取气象条件数据, 计算一个时间步长内的地图上的放射性物质的时间平均浓度分布, 并将数据传给撤离模块。撤离模块根据撤离路径对撤离人员进行移动和剂量评估。此时, 地图模块更新地图上不同区域的放射性物质浓度分布和已选定的撤离路径, 并将时间增加一个时间步长。直到把所有人员撤离到达指定的撤离安置点。

本研究利用这套基于动态放射性剂量的核事故撤离模型和软件, 根据给定气象条件下的放射性物质分布, 结合“锁孔”撤离策略给出多条撤离路径, 计算出不同撤离路径下的个人辐射剂量值。

4. 辐射剂量计算分析

基于上节的事事故撤离模型, 对计算所需的参数进行选择和设置, 计算不同撤离情境下的个人辐射剂量值, 并对计算结果进行分析。计算涉及的参数包括: 放射性物质释放的相关源项参数、核电厂周围的

气象数据、人口分布、路网信息等。

4.1. 事故源项参数

在计算分析中采用 I-131 和 Cs-137 作为释放的放射性核素代表。假设每间隔 15 分钟从反应堆破口处释放一团放射性污染物, 并由大气扩散模块计算所有已释放的放射性污染物在计算区域内的时间平均浓度分布。假设事故发生后, 放射性物质第一次向环境释放的时间为模拟的初始计算时间, 即第 0 秒。根据福岛核事故的源项反演研究, 2011 年 3 月 11 日 17 时到 2011 年 4 月 12 日共计释放了 1.6×10^{17} Bq 的 I-131 和 1.5×10^{16} Bq 的 Cs-137 [6], 将这一结果的平均小时值作为源项参数(见表 1)。此外, 这两种放射性核素的干沉降速率被设置为恒定数值。

Table 1. Accident source item parameters
表 1. 事故源项参数

参数	数值
水平方向初始扩散系数(σ_{xy})	10 m
垂直方向初始扩散系数(σ_z)	5 m
释放高度	25 m
I-131 释放率	2.064×10^{14} Bq/h
I-131 沉降速度	0.003 m
Cs-137 释放率	1.935×10^{13} Bq/h
Cs-137 沉降速度	0.001 m

4.2. 气象、路径参数

基于对某核电厂一定范围内历史气象数据的统计分析, 计算分析选取了具有典型意义的气象数据条件, 即: 南风 S、西南偏南风 SSW、西南风 SW 的风向。基于人口分布方位, 在 5 Km 范围内设置 1 个撤离点, 在 5~10 Km 范围内设置 2 个撤离点, 人口分布在东偏北的撤离点 1、人口分布在东偏南的撤离点 2。基于“锁孔”撤离方案, 在原有的撤离终点 A 的基础上, 分别在下风向的两侧设置撤离终点 B、C。B 点为下风向的右侧, C 点为下风向的左侧。

撤离启动时间为事故放射性物质释放后半个小时, 假设撤离速度为国道、高速 60 km/h, 其他道路为 30 km/h。撤离情景参数见表 2 示。

Tabel 2. Evacuation scenario parameters
表 2. 撤离情景参数

撤离起始点	撤离路径终点	路径编号	气象条件
5 Km 范围内的撤离点	A	R1A	S 风 3 级
	B	R1B	SSW 风 5 级
	C	R1C	SW 风 4 级
5~10 Km 范围内的撤离点 1 (东偏北方位)	A	R2A	S 风 3 级
	B	R2B	SSW 风 5 级
	C	R2C	SW 风 4 级
5~10 Km 范围内的撤离点 2 (东偏南方位)	A	R3A	S 风 3 级
	B	R3B	SSW 风 5 级
	C	R3C	SW 风 4 级

4.3. 计算结果分析

不同撤离情景下的个人所受辐射剂量值不同, 利用撤离模型计算得到的个人辐射剂量值见图 2 所示。

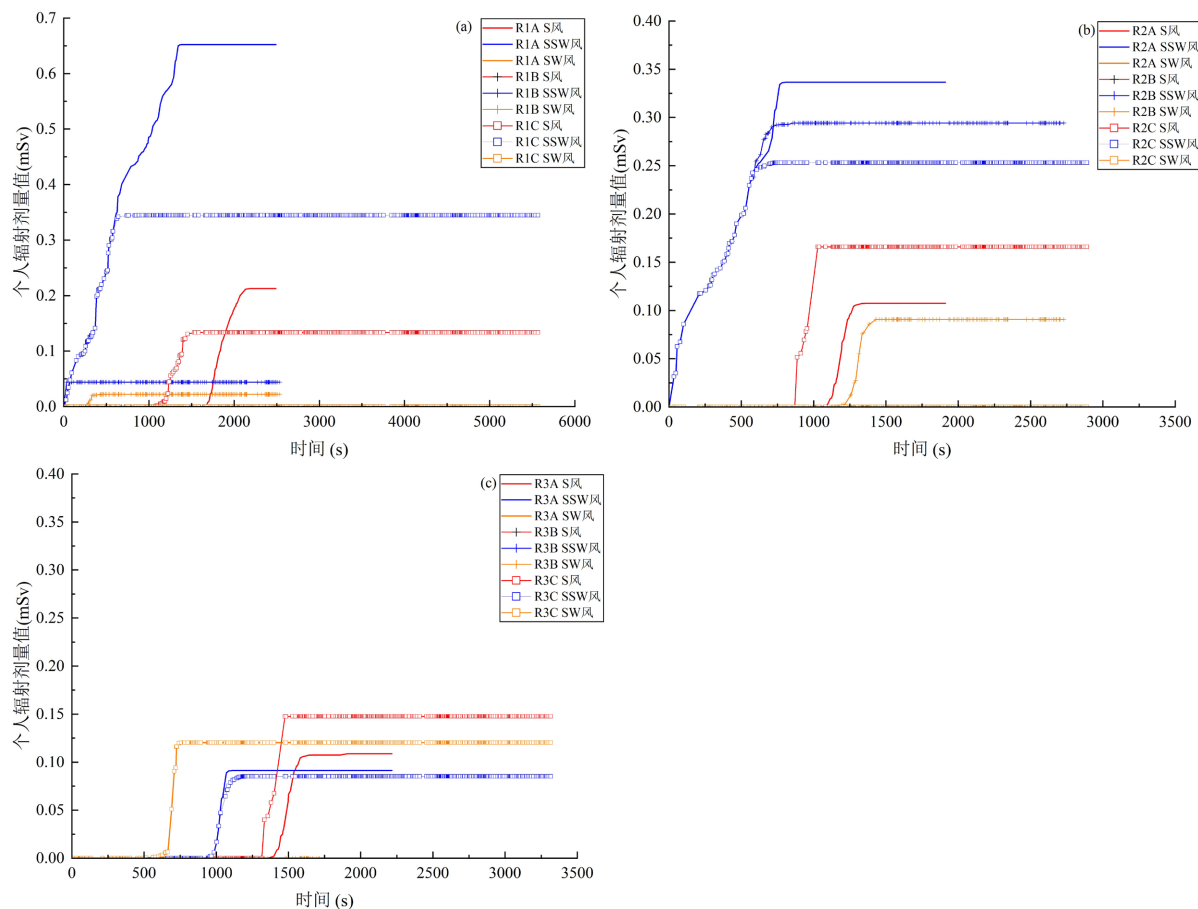


Figure 2. Individual radiation dose values under different evacuation scenarios

图 2. 不同撤离情景下的个人辐射剂量值

图 2(a) 核电厂 5 Km 范围内的撤离, 在 S (南风)、SSW (西南偏南风) 风向的气象条件下, 撤离终点为 A 的路径撤离, 撤离公众的个人辐射剂量最大。撤离终点为 B 的路径撤离, 撤离公众的个人辐射剂量最小。在 SW (西南风) 风向的气象条件下, 各撤离路径的公众个人辐射剂量值较小。

图 2(b) 核电厂 5~10 Km 范围内撤离起点东偏北方位撤离, 在 SSW 风向的气象条件下, 撤离终点为 A 的路径撤离, 撤离公众的个人辐射剂量最大。在 S 风向的气象条件下, 撤离终点为 C 的路径撤离, 撤离公众的个人辐射剂量最大。在 SW 风向的气象条件下, 撤离终点为 B 的路径撤离, 撤离公众的个人辐射剂量最大, 但辐射剂量值较小。

图 2(c) 核电厂 5~10 Km 范围内撤离起点东偏南方位撤离, 在 S、SSW、SW 风向的气象条件下, 撤离终点为 A 和 C 的撤离路径, 其撤离公众的个人辐射剂量值比撤离终点为 B 的撤离路径要高。

以上计算分析表明, 不同气象条件、不同路径的撤离, 个人所受的辐射剂量值不同。以 A 点为撤离终点的三条撤离路径的个人辐射剂量值较高。以 B 点为撤离终点的三条撤离路径的个人辐射剂量值较低。

5. 撤离对策建议

在对某核电厂气象数据进行统计分析的基础上, 结合路网, 并基于撤离模型, 对不同撤离情景下的撤离时间及撤离路径个人所受辐射剂量进行计算分析。结果表明, 不同气象条件下, 不同撤离路径的公众所受的个人辐射剂量不同。基于预定的单撤离路径, 在特定情境下并不会达到预期的效果, 甚至会带来不好的后果。因此, 在制定应急撤离预案时应该结合考虑不同气象条件、不同撤离路径和个人辐射剂量值等因素。

核电厂发生造成放射性物质释放的严重事故时, 结合气象信息, 以公众所受个人辐射剂量值为评价依据, 并优先考虑“锁孔”撤离区居民的撤离是一种安全、高效撤离方案。本研究为现有的应急预案提供另一个评估维度, 为核事故应急决策提供技术参考。在后续工作中, 撤离模型中结合上地图实时导航的预测撤离速度, 计算不同路径的个人辐射剂量值, 同样具有指导意义。

基金项目

本文获得福建省创新战略研究计划项目(2020R0102)资助。

参考文献

- [1] Jones, J., *et al.* (2007) Review of NUREG-0654, Supplement 3, “Criteria for Protective Action Recommendations for Severe Accidents”. Vol. 3, NRC.
- [2] NRC (1996) Generic Environmental Impact Statement for License Renewal of Nuclear Plants (NUREG-1473). Vol. 2, NRC.
- [3] 赵建军, 罗海英. 宁德核电厂应急撤离路线代价利益分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2009, 42(S1): 1-5.
- [4] EPRI (2007) Risk-Informed Evaluation of Protective Action Strategies for Nuclear Plant Off-Site Emergency Planning.
- [5] Scire, J.S., Strimaitis, D.G. and Yamartino, R.J. (2000) A User’s Guide for the CALPUFF Dispersion Model. Earth Tech, Inc., Concord, MA, 1-521.
- [6] 朱继洲. 核反应堆安全分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2018.