



核科学与工程

# 基于 ARCON 方法的先进小堆燃料操作 事故放射性后果分析\*

王韶伟<sup>1</sup>, 王一川<sup>1</sup>, 巩建业<sup>2,1</sup>, 陈海英<sup>1</sup>, 李 帷<sup>1</sup>, 刘巧凤<sup>1</sup>

(1. 生态环境部核与辐射安全中心, 北京 102401; 2. 华能山东石岛湾核电有限公司, 山东 威海 264300)

**摘 要:** 根据小型供热堆的设计特点, 建立了燃料操作事故源项计算模型, 研究事故后放射性核素的释放, 并基于国外小型堆事故放射性后果分析经验和 RG4.28 提供的 ARCON 方法, 开展了燃料操作事故后大气弥散因子和场址边界处个人所受剂量的分析。结果表明: 燃料操作事故后 2 h, 燃料包壳间隙的放射性核素释放到环境中, 释放到环境的放射性活度达到  $10^{14}$  Bq 水平, 其中惰性气体的释放量高于碘,  $^{133}\text{Xe}$  释放量最大; 事故后 30 d 燃料操作事故所致的场址边界处个人有效剂量和甲状腺剂量可满足剂量限值要求, 剂量最大值位于东北东方位。

**关键词:** 先进小堆; ARCON 方法; 燃料操作事故; 事故源项; 剂量

中图分类号: TL732

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220315

## Analysis on radiological consequence in fuel handling accident for advanced small reactor based on ARCON methodology

Wang Shaowei<sup>1</sup>, Wang Yichuan<sup>1</sup>, Gong Jianye<sup>2,1</sup>, Chen Haiying<sup>1</sup>, Li Wei<sup>1</sup>, Liu Qiaofeng<sup>1</sup>

(1. Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Ecology and Environment, Beijing 102401, China;

2. Huaneng Shandong Shidaowan Nuclear Power Co., Ltd., Weihai 264300, China)

**Abstract:** The accident source term and radiological consequence evaluation of small heating reactor at site boundary is the key content of nuclear and radiation safety review. According to the design characteristics of the advanced small reactor, the accident source term calculation model is established for fuel handling accident to study the release of radionuclides after the accident. Based on the experience of accident radiological consequence analysis of small reactor abroad and ARCON methodology in RG4.28, the atmospheric dispersion factor and individual dose at site boundary in fuel handling accident are analyzed. The results show that two hours after the accident, the radionuclides in the fuel cladding gap release into the environment, and the release amount of radionuclide in the environment reaches the radioactivity level of  $10^{14}$  Bq. The release amount of inert gas is higher than that of iodine, and that of  $^{133}\text{Xe}$  is the largest. The individual effective dose and thyroid dose at the site boundary after 30 days of the fuel handling accident are within the dose limits and the maximum dose occurs at the east-north-east direction. The results of the accident source term and radiological consequence could provide technical support for offsite dose assessment and review of the advanced small reactor.

**Key words:** advanced small reactor, ARCON methodology, fuel handling accident, accident source term, dose

核能不仅可以用于发电, 而且可以通过热交换的方式将核裂变产生的热能转化为城市供热所需要的水或蒸汽, 实现清洁供热, 减少  $\text{CO}_2$  排放<sup>[1-2]</sup>。模块化小型供热堆具有功率小、安全性高、建设周期短、选址成本低、灵活性高、清洁低碳等特点, 得到广泛认可<sup>[3-6]</sup>。我国高度重视小型堆核动力技术的研究, 《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》中提出了推动模块式小型堆、 $6 \times 10^5$  kW 级商用高温气冷堆、海上浮动式核动力平台等先进堆型示范<sup>[7]</sup>。

在选址阶段, 事故源项及放射性后果分析是确定场址非居住区 (EAB)、规划限制区 (LPZ) 边界的依据<sup>[8]</sup>。因

\* 收稿日期: 2022-09-29; 修订日期: 2023-03-06

联系方式: 王韶伟, [sinodapy@126.com](mailto:sinodapy@126.com)。

通信作者: 陈海英, [chy1025@126.com](mailto:chy1025@126.com)。

此,开展事故源项及放射性后果评价是小型堆设计、安全分析及审评中的重要内容。目前,国内小型堆选址假想事故的选取、ARCON程序对小型堆场外大气弥散因子计算的适用性是关注的焦点。美国核管会(NRC)近年来开展了NuScale模块化小堆设计认证申请的审查,NuScale事故放射性后果分析中对比了PAVAN和ARCON96程序的差异,最终采用了改进的ARCON96程序计算大气弥散因子<sup>[9]</sup>。2021年8月NRC发布了新的监管指南《采用ARCON方法计算与事故相关的场外大气弥散因子》(RG4.28),该监管指南提出了使用ARCON程序计算EAB、LPZ直到1200 m处的场外大气弥散值,ARCON方法为我国小型堆事故放射性后果评价提供了重要参考<sup>[10]</sup>。燃料操作事故是小型堆典型的设计基准事故之一。本文针对国内某模块化小型供热堆的设计特点,基于RG1.183和RG4.28建立燃料操作事故源项、大气弥散因子、剂量计算模型,开展小型堆场址边界处放射性后果研究,以确定放射性物质的释放和所致剂量大小。

## 1 模型和参数

燃料操作事故是在换料期间装卸燃料组件时,发生燃料组件跌落。发生燃料操作事故后,燃料棒包壳损坏,核素从包壳间隙中释放出来,经乏燃料水池水洗过滤后进入厂房,然后释放到环境中,在大气中迁移扩散,给公众造成潜在辐射影响。事故放射性后果分析流程如图1所示。

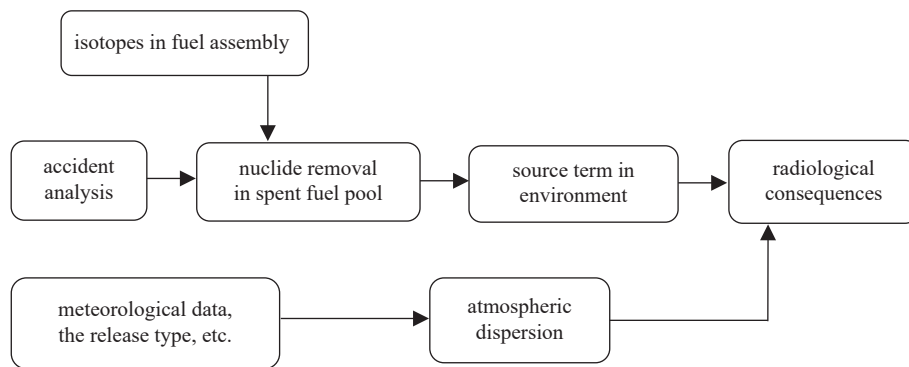


Fig. 1 Flowchart of accident radiological consequence analysis

图1 事故放射性后果分析流程

### 1.1 计算模型

#### 1.1.1 事故源项

燃料操作事故中释放到环境中的放射性活度计算模型如下

$$A_{ei} = \begin{cases} \frac{A_{0i}F_iF_{xy}\varepsilon_i r t}{TF_d}, & t < T \\ \frac{A_{0i}F_iF_{xy}\varepsilon_i r}{F_d}, & t \geq T \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $A_{ei}$  是事故后环境中的核素  $i$  放射性活度,  $Bq$ ;  $A_{0i}$  是发生事故时堆芯燃料组件内的核素  $i$  初始放射性活度,  $Bq$ ;  $F_i$  是燃料组件内核素  $i$  释放到乏燃料水池的份额;  $F_{xy}$  是径向功率峰因子;  $\varepsilon_i$  是各形态碘的份额, 对于碘之外的其他核素  $\varepsilon_i=1$ ;  $r$  是燃料棒破损率;  $t$  是事故后时间,  $t=T$  时核素全部释放到环境中,  $h$ ;  $T$  是事故后核素释放到环境的持续释放时间,  $h$ ;  $F_d$  是乏燃料水池对核素的去污因子, 水层过滤仅对元素碘有显著的去污作用, 其他核素  $F_d=1$ 。

#### 1.1.2 大气弥散因子

RG4.28 提出的 ARCON 方法认可使用 ARCON 程序计算 EAB、LPZ 直到 1200 m 处的场外大气弥散值, ARCON 程序指的是 ARCON96 和 ARCON 2.0 版本<sup>[10]</sup>。ARCON96 程序无法直接计算 99.5% 概率水平的大气弥散因子 ( $\chi/Q$ ), 且 ARCON96 计算每个指定方位的大气弥散因子都需要执行一次代码。本文采用 ARCON96 程序计算 16 个方位和全场址 95% 概率水平的  $\chi/Q$ <sup>[11-12]</sup>。基于 RG4.28 中的方法, 获得每个方位 99.5% 概率水平的  $\chi/Q$ , 即采用公式(2)计算并确定超过每个  $\chi/Q$  阈值的时间百分比, 采用公式(3)插值计算第 99.5 个百分位的  $\chi/Q$ <sup>[10]</sup>。取 16 个方位 99.5% 概率水平和全场址 95% 概率水平的大气弥散因子中的较大值用于剂量评估。

$$P = \left(1 - \frac{H_{avg}}{H_{total}}\right) \times 100 \quad (2)$$

$$a = a_1 + \frac{b - b_1}{b_2 - b_1} \cdot (a_2 - a_1) \quad (3)$$

式中： $P$ 为超过每个 $\chi/Q$ 阈值的时间百分比； $H_{\text{total}}$ 为LOG文件中给定平均间隔的总小时数； $H_{\text{avg}}$ 为超过每个 $\chi/Q$ 阈值的小时数； $a$ 为第99.5个百分位的 $\chi/Q$ 值； $a_1$ 、 $a_2$ 分别为两个边界 $\chi/Q$ 值中的较小者和较大者； $b=99.5$ ； $b_1$ 、 $b_2$ 分别为两个超标频率中的较小者和较大者。

### 1.1.3 剂量分析

个人有效剂量考虑烟云浸没外照射、地面沉积外照射和吸入内照射3个途径。个人有效剂量和甲状腺剂量计算模型如下

$$D_g = \sum_i Q_i \cdot \omega_i \cdot F_i^g \cdot (1 - e^{-\lambda_i \cdot t_n}) / \lambda_i \quad (4)$$

$$D_a = \sum_i Q_i \cdot (\chi/Q)_d \cdot F_i^a \quad (5)$$

$$D_i = \sum_i Q_i \cdot (\chi/Q)_d \cdot Br \cdot F_i^i \quad (6)$$

$$D_t = D_a + D_g + D_i \quad (7)$$

$$D_{\text{thy}} = \sum_i Q_i \cdot (\chi/Q)_d \cdot B_r \cdot F_i^{\text{thy}} \quad (8)$$

式中： $D_g$ 、 $D_a$ 、 $D_i$ 、 $D_t$ 、 $D_{\text{thy}}$ 分别是地面沉积外照射所致个人有效剂量、烟云浸没外照射所致个人有效剂量、吸入内照射所致个人有效剂量、总有效剂量和甲状腺剂量，Sv； $Q_i$ 是释放到环境的核素 $i$ 的放射性活度，Bq； $F_i^g$ 是核素 $i$ 的地面沉积有效剂量转换因子， $(\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1})/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2})$ ； $\omega_i$ 是核素 $i$ 的地面沉积因子， $1/\text{m}^2$ ； $\lambda_i$ 是核素 $i$ 的衰变常数， $1/\text{s}$ ； $t_n$ 是 $n$ 时段的释放时间，s； $(\chi/Q)_d$ 是距离释放点 $d_m$ 处的大气弥散因子， $\text{s}/\text{m}^3$ ； $F_i^a$ 是核素 $i$ 的烟云浸没外照射有效剂量转换因子， $(\text{Sv} \cdot \text{s}^{-1})/(\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3})$ ； $F_i^i$ 是核素 $i$ 的吸入内照射有效剂量转换因子， $\text{Sv}/\text{Bq}$ ； $B_r$ 是成人呼吸率， $\text{m}^3/\text{s}$ ； $F_i^{\text{thy}}$ 是核素 $i$ 的甲状腺剂量转换因子， $\text{Sv}/\text{Bq}$ 。

## 1.2 主要参数

燃料操作事故源项计算参数取值参考RG1.183，其中假设CsI在乏燃料水池中立即全部转变成元素碘，各形态碘的份额为99.85%的元素碘和0.15%的有机碘，碘的总体去污因子为200，核素从燃料组件释放到乏燃料水池的份额 $^{131}\text{I}$ 为8%， $^{85}\text{Kr}$ 为10%，其它碘和惰性气体为5%，发生事故的燃料组件以最大燃料功率因子运行<sup>[13]</sup>。燃料棒破损率为1/57，径向功率峰因子取值2.0。剂量转换因子取自GB18871、ICRP71号报告<sup>[14-15]</sup>。

根据小型压水堆核动力厂安全目标，对于设计基准事故中的极限事故，场址边界上个人（成人）在整个事故持续时间内可能受到的有效剂量应小于10 mSv，甲状腺当量剂量应小于100 mSv<sup>[16]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 事故释放源项

燃料操作事故发生后，燃料棒包壳破损，包壳间隙中的核素进入水池，经水层过滤后释放至厂房，最终释放到环境中，释放持续2 h。事故后环境中的碘活度如图2所示，0~2 h，环境中的碘放射性活度不断增加，2 h之后达到稳定，元素碘的释放量高于有机碘，这是由于粒子碘(CsI)在低pH值的水中转变成元素碘导致的。受燃料棒包壳间隙中核素初始活度的影响，释放到环境的碘放射性活度从大到小依次为 $^{131}\text{I}$ 、 $^{133}\text{I}$ 、 $^{135}\text{I}$ 、 $^{130}\text{I}$ 、 $^{132}\text{I}$ 。

事故后释放到环境中的惰性气体变化曲线与碘相似，如图3所示，0~2 h释放量逐渐增加，之后达到平衡。因水层过滤对惰性气体不起作用，释放到环境中的惰性气体放射性活度高于碘，环境中的 $^{133}\text{Xe}$ 释放量最大，达到 $10^{14}\text{Bq}$ 水平。

### 2.2 大气弥散因子

事故后0~2 h各方位和全场址的大气弥散因子值如图4所示。各方位的最大弥散因子值位于东北东方位(ENE)，且高于全场址大气弥散因子。

### 2.3 辐射剂量分析

事故后30 d燃料操作事故所致场址边界处个人有效剂量和甲状腺剂量如图5和图6所示。由图可知，采用

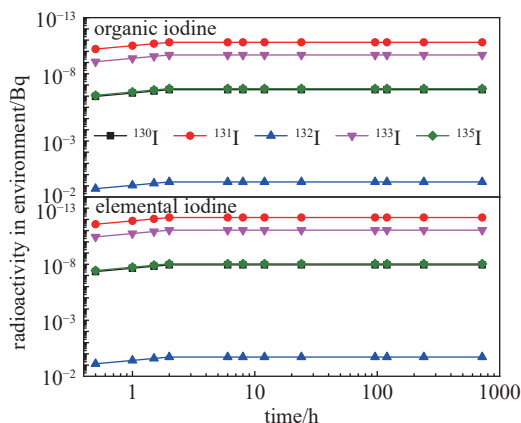


Fig. 2 Radioactivity of iodine released to the environment in fuel handling accident

图 2 燃料操作事故释放到环境中的碘放射性活度

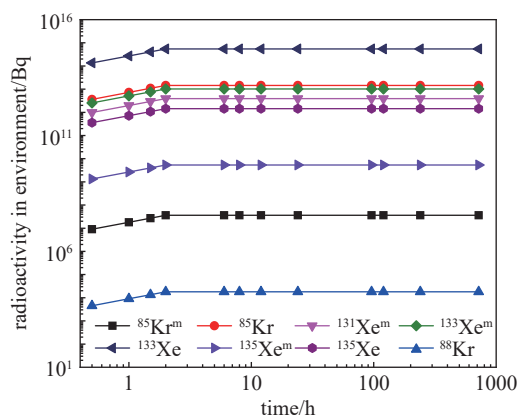


Fig. 3 Radioactivity of inert gas released to the environment in fuel handling accident

图 3 燃料操作事故释放到环境中的惰性气体放射性活度

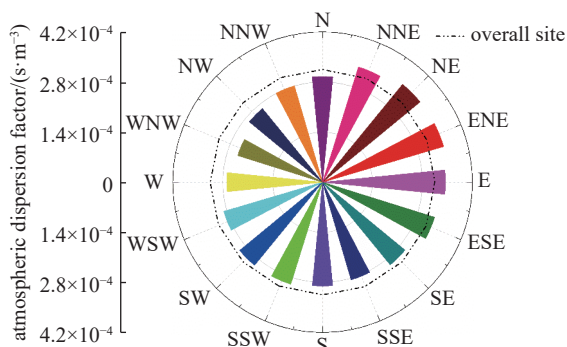


Fig. 4 Atmospheric dispersion factors for all directions and the overall site after the accident

图 4 事故后各方位及全场址大气弥散因子

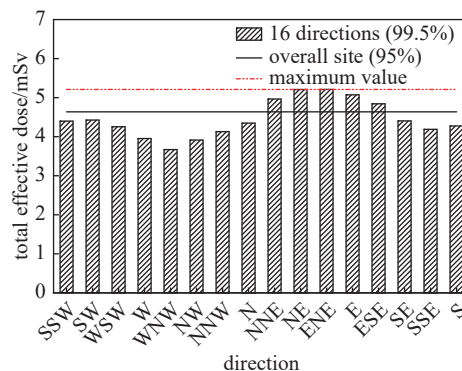


Fig. 5 Total effective doses at site boundary in fuel handling accident

图 5 燃料操作事故所致场址边界处有效剂量

16 个方位 99.5% 概率水平的弥散因子计算的有效剂量和甲状腺剂量中, 东北东方位 (ENE) 的计算结果最大, 分别为 5.2 mSv 和 97 mSv, 东北方位 (NE) 的剂量结果与东北东方位相近, 高于全场址 95% 概率水平的大气弥散因子的有效剂量和甲状腺剂量。采用 16 个方位和全场址弥散因子中的较大值计算的有效剂量、甲状腺剂量与东北东方位结果相同, 原因是从水层释放出来的放射性核素在 2 h 内全部释放到环境中, 之后不再有核素向环境释放, 因此剂量计算结果仅受事故后 0~2 h 弥散因子值的影响, 与其他时段的弥散因子值无关, 该时段东北方位的弥散因子值高于全场址弥散因子值。最终剂量计算结果满足《小型压水堆核动力厂安全审评原则(试行)》规定的极限事故剂量限值要求。

### 3 结 论

基于国外小型压水堆事故放射性后果分析经验, 建立了燃料操作事故后环境中的核素放射性活度计算模型, 并根据 NRC 最新发布的 RG4.28, 对国内某先进小堆的燃料操作事故源项与放射性后果开展了计算分析。主要结论如下: (1) 因乏燃料水池的水层过滤作用, 释放到环境中的碘放射性活度低于惰性气体, 环境中各碘核素的放射性活度从大到小, 依次是  $^{131}\text{I}$ 、 $^{133}\text{I}$ 、 $^{135}\text{I}$ 、 $^{130}\text{I}$ 、 $^{132}\text{I}$ ; (2) 燃料操作事故后 30 d 释放到环境中的放射性核素活度达到  $10^{14}\text{Bq}$  水平, 其中  $^{133}\text{Xe}$  释放量最大; (3) 燃料操作事故所致场址边界处个人有效剂量和甲状腺剂量分别为 5.2 mSv 和 97 mSv, 剂量最大值出现在东北东方位。ARCON96 程序引入了修正模型, 提高了低风速下建筑物周围相对浓

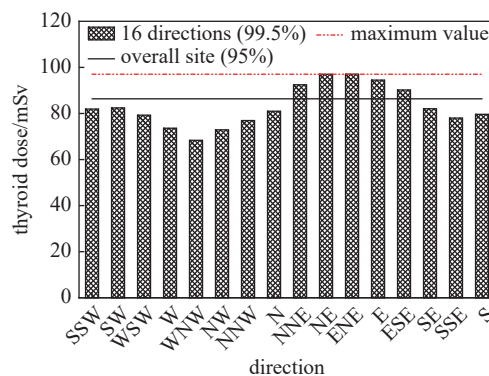


Fig. 6 Thyroid doses at site boundary in fuel handling accident

图 6 燃料操作事故所致场址边界处甲状腺剂量



度计算结果的准确性,然而 ARCON96 程序需运行多次才能获得各方位的相对浓度,且数据处理繁琐,在后续研究中需要开发一体化大气弥散因子计算程序,简化运算操作及数据处理流程,提高计算效率。

#### 参考文献:

- [1] 周涛,张海龙,刘文斌. 小型反应堆在综合能源系统中作用的研究[J]. 华电技术, 2021, 43(4): 39-46. (Zhou Tao, Zhang Hailong, Liu Wenbin. Research on the role of small reactors in integrated energy systems[J]. Huadian Technology, 2021, 43(4): 39-46)
- [2] 常德健,漆小玲,王静,等. 模块化小型堆用于集中供热的减排潜力分析[J]. 新能源进展, 2021, 9(1): 76-84. (Chang Dejian, Qi Xiaoling, Wang Jing, et al. Analysis of emission reduction potential of small modular reactor for central heating[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2021, 9(1): 76-84)
- [3] 陈文军,姜胜耀. 中国发展小型堆核能系统的可行性研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(2): 153-156. (Chen Wenjun, Jiang Shengyao. Feasibility study on development of small nuclear power reactors in China[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(2): 153-156)
- [4] 周蓝宇,齐实,周涛. 小型模块化反应堆发展趋势及前景[J]. 科技创新与应用, 2017(21): 195-196. (Zhou Lanyu, Qi Shi, Zhou Tao. Development trend and prospect of small modular reactor[J]. Technology Innovation and Application, 2017(21): 195-196)
- [5] 曲静原,张琳,黄挺. 小型堆研发及核应急准备进展[J]. 科技导报, 2013, 31(35): 71-75. (Qu Jingyuan, Zhang Lin, Huang Ting. Emergency preparedness for small modular reactors[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(35): 71-75)
- [6] 丁锡嘉,周涛,张家磊,等. 小型模块化核反应堆技术安全性研究[J]. 科技创新与应用, 2019(34): 19-21. (Ding Xijia, Zhou Tao, Zhang Jialei, et al. Study on technical safety of small modular nuclear reactor[J]. Technology Innovation and Application, 2019(34): 19-21)
- [7] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要[R]. 北京: 国家发展和改革委员会. 2021: 29-31. (National Development and Reform Commission. The 14th five-year plan for national economic and social development of the People's Republic of China and outline of the vision for 2035[R]. Beijing: National Development and Reform Commission, 2021: 29-31)
- [8] GB 6249-2011核动力厂环境辐射防护规定[S]. (GB 6249-2011 Regulations for environmental radiation protection of nuclear power plant[S])
- [9] NRC. PHASE 6-NuScale DC final safety evaluation report (complete with appendices)[R/OL]. (2020-08-28)[2021-01-25]. <https://www.nrc.gov/docs/ML2002/ML20023A318.html>.
- [10] NRC. Use of ARCON methodology for calculation of accident-related offsite atmospheric dispersion factors, regulatory guide 4.28[R]. Washington: NRC, 2021.
- [11] Ramsdell J V Jr, Simonen C A. Atmospheric relative concentrations in building wakes[R]. NUREG/CR-6331, 1997.
- [12] NRC. Atmospheric relative concentrations for control room radiological habitability assessments at nuclear power plants, regulatory guide 1.194[R]. Washington: NRC, 2003.
- [13] NRC. Alternative radiological source terms for evaluating design basis accidents at nuclear power reactors, regulatory guide 1.183[R]. Washington: NRC, 2000.
- [14] GB 18871-2002电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. (GB 18871-2002 Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources[S])
- [15] ICRP. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 4 Inhalation dose coefficients[R]. Netherlands: ICRP, 1996.
- [16] 国家核安全局. 小型压水堆核动力厂安全审评原则(试行)[R]. 北京: 国家核安全局, 2016. (National Nuclear Safety Administration. Principles for safety review of small pressurized water reactor nuclear power plants (trial)[R]. Beijing: National Nuclear Safety Administration, 2016)