

# 基于 RASCAL 软件的核电厂事故后放射性核素不同释放途径对公众剂量的影响

郭瑞萍 杨春林 陈海英 张春明

100082 北京, 环境保护部核与辐射安全中心(郭瑞萍、陈海英、张春明); 453000 新乡, 河南科技学院(杨春林)

通信作者: 杨春林, Email: benjami@163.com

DOI: 10.3760/cma.j.issn.0254-5098.2016.10.010

**【摘要】 目的** 探讨核电厂事故后放射性核素不同释放途径对公众照射剂量的影响。**方法** 利用核事故后果评价软件(RASCAL 4.3)对长期全厂断电(LTSBO)事故下压水堆核电厂不同释放途径情景下放射性核素所致公众照射剂量分布特征进行模拟计算。**结果** 通过蒸汽发生器传热管破裂释放途径进入到环境中的放射性核素活度最高,安全壳泄漏或失效时通过安全壳释放途径进入到环境中的放射性核素活度最低。不同释放情景下总有效剂量当量(TEDE)剂量主要分布在距释放点 40 km 区域内,当安全壳泄漏或失效时通过安全壳释放和通过旁路安全壳释放情景下 80 km 范围内大部分扇区 TEDE 剂量 < 10 mSv,通过蒸汽发生器传热管破裂释放情景下 80 km 范围内大部分扇区 TEDE 剂量 > 50 mSv。**结论** 在核电厂环境影响分析时应重点关注 LTSBO 事故时通过蒸汽发生器传热管破裂释放途径对公众健康造成的放射性影响。

**【关键词】** 公众健康; 照射剂量; 辐射环境影响; 释放途径; LTSBO 事故

**基金项目:** 国家科技重大专项 CAP1400 安全审评关键技术研究(2013ZX06002001)

**RASCAL software-based impact assessment of public dose from radionuclides discharged via different release paths in the aftermath of nuclear power plant accident** Guo Ruiping, Yang Chunlin, Chen Haiying, Zhang Chunming

Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China (Guo RP, Chen HY, Zhang CM); Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China (Yang CL)

Corresponding author: Yang Chunlin, Email: benjami@163.com

**【Abstract】 Objective** To identify the effects of different release paths on public dose in the aftermath of a NPP accident. **Methods** RASCAL4.3 software was used to simulate the source terms of PWR NPPs and the characteristics of dose distribution in different release path scenarios of long term station blackout (LTSBO) accident. **Results** It had been shown that radioactivity was the highest in Scenario 2, which was the release path for releases of radionuclides into the environment due to steam generator tube rupture. Radioactivity was the lowest in Scenario 1, which was the release path for radionuclides to be released into the environment in the case of containment leakage or failure. TEDE dose was mainly distributed in the region within 40 km of the release point in different scenarios. TEDE dose in the most sectors within 80 km was low than 10 mSv in Scenario 1, which was the release path via containment in containment leakage or failure and in Scenario 3, which was the release path by containment bypass. It was greater than 50 mSv in Scenario 2, which was the release path due to steam generator tube rupture. **Conclusions** For the environmental impact assessment, it should be paid more attention to the fact that the public health impact imposed by radionuclide release into the environment via the release path due to steam generator tube rupture in the aftermath of LTSBO accident at a NPP.

**【Key words】** Public health; Radiation dose; Radioactive environment impact; Release path; LTSBO accident

**Fund program:** National Key Scientific and Technological Project CAP1400 Safety Review Key Technology Study (2013ZX06002001)

核电厂发生严重事故时会造成大量放射性物质释放到环境中,对公众健康造成影响。其影响主要通过事故后果评价确定<sup>[1]</sup>,需考虑源项、大气弥散过程和剂量估算 3 个方面。目前使用较多的核事故后果评价程序有美国的放射性后果评价软件(RASCAL)和事故释放源项估算程序(MELCOR)及事故后果计算系统<sup>[2]</sup>、欧洲的实时在线决策支持系统、日本的环境应急剂量信息预测系统<sup>[3,4]</sup>等。核事故后果评价程序可模拟放射性物质在大气环境中迁移传输过程,本研究以 RASCAL 软件为例,分析了核电厂长期全厂断电(LTSBO)事故后放射性核素不同释放途径的源项特征和剂量分布特征,并评价了对公众剂量的影响。

### 材料与方 法

1. 程序简介:本研究用到的 RASCAL 软件是美国核事故后果评价系统系列最新版本软件,版本号为 4.3。该软件由美国橡树岭国家实验室批准环境保护部核与辐射安全中心授权使用。该软件为美国核管会进行核事故后果评价而研发,可用于评价核电厂、乏燃料储水池、核燃料循环设施,放射性物质操作设施的放射性物质释放特征。RASCAL 软件考虑源项、核素迁移传输、剂量和后果计算<sup>[5-7]</sup>,适用于放射性应急响应时基于核电厂状况进行剂量防护独立评价。源项计算时考虑潜在放射性事故情景下放射性物质释放源项。RASCAL 4.3 软件包括创建积存量文件、输出源项、气象数据预处理等功能,它提供长期全厂断电(LTSBO)<sup>[8]</sup>和冷却剂丧失(LOCA)两种事故估算堆芯熔化放射性物质释放的事故序列。LTSBO 事故序列是缓慢发展的事故序列,反应堆堆芯温度在冷却剂蒸发之后才开始上升,LTSBO 事故源项是基于 MELCOR 软件计算的事故序列。放射性物质释放到安全壳和环境是在核电厂电源丧失 10~12 h 后,该事故对公众健康造成的影响较大。

2. 情景假设:以某核电厂为研究对象,厂址地形平坦,初始气象条件设为 2015 年 8 月的逐日气象数据,以此作为事故时释放核素大气扩散的气象驱动场。该核电厂 1 台机组反应堆功率为 3 050 MWt,冷却水质量为  $2.2 \times 10^5$  kg,采用 U 型管蒸汽发生器,蒸汽发生器水质量为  $4.2 \times 10^4$  kg。

根据 LTSBO 事故下放射性核素的不同释放途径对剂量产生的影响,设置情景 1、情景 2 和情景 3

这 3 种途径进行比较分析。情景 1 是当安全壳泄漏或失效时通过安全壳释放,即裂变产物从反应堆冷却剂系统中释放到安全壳再经失效的安全壳向环境释放;情景 2 是通过蒸汽发生器传热管破裂释放,即来自反应堆冷却剂系统中的裂变产物通过破损蒸汽发生器传热管到达二次侧后经卡开的安全阀释放到环境;情景 3 是通过旁路安全壳释放,即通过安全壳与辅助厂房的连接处释放到辅助厂房后再向环境释放。RASCAL 4.3 软件中通过输入气象数据、核电厂设计参数等,运行计算后可输出源项、TEDE 剂量、甲状腺待积剂量和空气浓度等,其中 TEDE 剂量包括烟云浸没外照射有效剂量、空气吸入内照射有效剂量和地面沉积外照射有效剂量。

### 结 果

1. 不同情景下源项:3 种情景下释放的所有核素的总放射性活度以及相应的核素放射性活度的 25%~75% 集中分布范围和 5%~95% 集中分布范围见表 1。不同情景事故时释放的核素放射性活度存在差异,放射性活度排序前 15 位的核素见表 2。3 种情景下所有核素中<sup>133</sup>Xe 的放射性活度均最大,分别占核素总放射性活度的 31.3%、24.3% 和 66.3%。情景 2 和情景 3 释放的所有核素中<sup>132</sup>I 和<sup>135</sup>Xe 的放射性活度为次大值,依次占核素总放射性活度的 11.9% 和 25.3%。情景 1 释放的核素中<sup>132</sup>I、<sup>132</sup>Te 和<sup>135</sup>Xe 的放射性活度相同,均为次大值。

表 1 不同情景下释放的总放射性活度及分布范围(Bq)

Table 1 Total radioactivity and its distribution in atmosphere in different scenarios(Bq)

情景	总放射性活度	25%~75%分布范围	5%~95%分布范围
1	$1.28 \times 10^{16}$	$3.60 \times 10^{11} \sim 6.40 \times 10^{13}$	$7.64 \times 10^7 \sim 1.26 \times 10^{15}$
2	$2.18 \times 10^{19}$	$5.40 \times 10^{14} \sim 1.30 \times 10^{17}$	$1.17 \times 10^{11} \sim 2.24 \times 10^{18}$
3	$8.30 \times 10^{18}$	$1.50 \times 10^{12} \sim 7.48 \times 10^{14}$	$4.40 \times 10^7 \sim 1.23 \times 10^{17}$

2. 不同情景下 TEDE 剂量:3 种情景下核素通过不同照射途径对相应剂量计算的贡献份额有显著差异,贡献份额排序前 10 位的核素见表 3~5。情景 1 和情景 2 对浸没外照射剂量贡献份额最大的核素均为<sup>132</sup>I,3 种情景对浸没外照射剂量贡献份额最大的核素依次为<sup>132</sup>I、<sup>132</sup>I 和<sup>135</sup>Xe。3 种情景对空气吸入内照射剂量贡献份额最大的核素均为<sup>131</sup>I。3 种情景对地面沉积外照射剂量贡献份额较大的核素依次为<sup>132</sup>I、<sup>132</sup>I 和<sup>88</sup>Rb。

表 2 不同情景下释放的不同核素放射性活度

Table 2 Radioactivity of different radionuclides released to atmosphere in different scenarios

情景 1		情景 2		情景 3	
核素	活度(Bq)	核素	活度(Bq)	核素	活度(Bq)
<sup>133</sup> Xe	4.00 × 10 <sup>15</sup>	<sup>133</sup> Xe	5.30 × 10 <sup>18</sup>	<sup>133</sup> Xe	5.50 × 10 <sup>18</sup>
<sup>132</sup> I	1.30 × 10 <sup>15</sup>	<sup>132</sup> I	2.60 × 10 <sup>18</sup>	<sup>135</sup> Xe	2.10 × 10 <sup>18</sup>
<sup>132</sup> Te	1.30 × 10 <sup>15</sup>	<sup>132</sup> Te	2.50 × 10 <sup>18</sup>	<sup>135</sup> Xe <sup>m</sup>	3.00 × 10 <sup>17</sup>
<sup>135</sup> Xe	1.30 × 10 <sup>15</sup>	<sup>133</sup> I	2.40 × 10 <sup>18</sup>	<sup>133</sup> Xe <sup>m</sup>	1.60 × 10 <sup>17</sup>
<sup>133</sup> I	1.20 × 10 <sup>15</sup>	<sup>131</sup> I	2.00 × 10 <sup>18</sup>	<sup>85</sup> Kr <sup>m</sup>	7.70 × 10 <sup>16</sup>
<sup>131</sup> I	1.00 × 10 <sup>15</sup>	<sup>135</sup> Xe	1.90 × 10 <sup>18</sup>	<sup>88</sup> Kr	6.00 × 10 <sup>16</sup>
<sup>135</sup> I	3.60 × 10 <sup>14</sup>	<sup>99</sup> Mo	7.50 × 10 <sup>17</sup>	<sup>131</sup> Xe <sup>m</sup>	3.80 × 10 <sup>16</sup>
<sup>99</sup> Mo	3.60 × 10 <sup>14</sup>	<sup>99</sup> Tc <sup>m</sup>	7.20 × 10 <sup>17</sup>	<sup>85</sup> Kr	3.00 × 10 <sup>16</sup>
<sup>99</sup> Tc <sup>m</sup>	3.50 × 10 <sup>14</sup>	<sup>135</sup> I	6.90 × 10 <sup>17</sup>	<sup>132</sup> I	6.30 × 10 <sup>15</sup>
<sup>239</sup> Np	2.00 × 10 <sup>14</sup>	<sup>134</sup> Cs	3.40 × 10 <sup>17</sup>	<sup>132</sup> Te	6.10 × 10 <sup>15</sup>
<sup>134</sup> Cs	1.70 × 10 <sup>14</sup>	<sup>239</sup> Np	3.00 × 10 <sup>17</sup>	<sup>133</sup> I	5.90 × 10 <sup>15</sup>
<sup>131</sup> Te <sup>m</sup>	1.40 × 10 <sup>14</sup>	<sup>131</sup> Te <sup>m</sup>	2.80 × 10 <sup>17</sup>	<sup>131</sup> I	4.80 × 10 <sup>15</sup>
<sup>137</sup> Cs	1.10 × 10 <sup>14</sup>	<sup>137</sup> Cs	2.40 × 10 <sup>17</sup>	<sup>99</sup> Mo	1.90 × 10 <sup>15</sup>
<sup>133</sup> Xe <sup>m</sup>	1.10 × 10 <sup>14</sup>	<sup>127</sup> Te	1.90 × 10 <sup>17</sup>	<sup>99</sup> Tc <sup>m</sup>	1.80 × 10 <sup>15</sup>
<sup>127</sup> Te	9.70 × 10 <sup>13</sup>	<sup>135</sup> Xe <sup>m</sup>	1.80 × 10 <sup>17</sup>	<sup>135</sup> I	1.70 × 10 <sup>15</sup>

表 3 不同核素浸没外照射剂量贡献份额(%)

Table 3 Contribution of different nuclides to submersion external exposure dose(%)

情景 1		情景 2		情景 3	
核素	贡献份额	核素	贡献份额	核素	贡献份额
<sup>132</sup> I	49	<sup>132</sup> I	49	<sup>135</sup> Xe	49
<sup>133</sup> I	11	<sup>133</sup> I	12	<sup>133</sup> Xe	29
<sup>135</sup> I	7	<sup>135</sup> I	7	<sup>88</sup> Kr	5
<sup>131</sup> I	6	<sup>131</sup> I	6	<sup>132</sup> I	3
<sup>135</sup> Xe	5	<sup>134</sup> Cs	5	<sup>88</sup> Rb	2
<sup>134</sup> Cs	4	<sup>132</sup> Te	4	<sup>85</sup> Kr <sup>m</sup>	1
<sup>132</sup> Te	4	<sup>131</sup> Te <sup>m</sup>	3	<sup>133</sup> Xe <sup>m</sup>	1
<sup>131</sup> Te <sup>m</sup>	4	<sup>135</sup> Xe	3	<sup>133</sup> I	1
<sup>133</sup> Xe	2	<sup>136</sup> Cs	2	<sup>135</sup> I	1
<sup>136</sup> Cs	1	<sup>133</sup> Xe	2	<sup>131</sup> I	1

表 4 不同核素空气吸入内照射剂量贡献份额(%)

Table 4 Contribution of different nuclides to air inhalation internal exposure dose(%)

情景 1		情景 2		情景 3	
核素	贡献份额	核素	贡献份额	核素	贡献份额
<sup>131</sup> I	32	<sup>131</sup> I	34	<sup>131</sup> I	33
<sup>241</sup> Pu	15	<sup>241</sup> Pu	12	<sup>241</sup> Pu	13
<sup>132</sup> Te	11	<sup>132</sup> Te	12	<sup>132</sup> Te	12
<sup>134</sup> Cs	8	<sup>134</sup> Cs	9	<sup>134</sup> Cs	8
<sup>106</sup> Ru	6	<sup>133</sup> I	6	<sup>133</sup> I	7
<sup>133</sup> I	6	<sup>106</sup> Ru	6	<sup>106</sup> Ru	6
<sup>144</sup> Ce	6	<sup>144</sup> Ce	5	<sup>144</sup> Ce	5
<sup>90</sup> Sr	4	<sup>137</sup> Cs	4	<sup>137</sup> Cs	4
<sup>137</sup> Cs	3	<sup>90</sup> Sr	3	<sup>90</sup> Sr	3
<sup>129</sup> Te <sup>m</sup>	2	<sup>129</sup> Te <sup>m</sup>	2	<sup>129</sup> Te <sup>m</sup>	2

3 种情景下 TEDE 剂量在 80 km 区域内变化范围依次为 4.00 × 10<sup>-1</sup> ~ 4.90 × 10、1.60 ~ 9.00 × 10<sup>4</sup>

和 6.10 × 10<sup>-1</sup> ~ 3.40 × 10<sup>2</sup> mSv, 见图 1。

表 5 不同核素地面沉积外照射剂量贡献份额(%)

Table 5 Contribution of different nuclides to ground deposition external exposure dose(%)

情景 1		情景 2		情景 3	
核素	贡献份额	核素	贡献份额	核素	贡献份额
<sup>132</sup> I	36	<sup>132</sup> I	36	<sup>88</sup> Rb	49
<sup>132</sup> Te	11	<sup>132</sup> Te	11	<sup>132</sup> I	18
<sup>134</sup> Cs	9	<sup>134</sup> Cs	10	<sup>132</sup> Te	6
<sup>133</sup> I	9	<sup>133</sup> I	9	<sup>134</sup> Cs	5
<sup>131</sup> Te <sup>m</sup>	7	<sup>131</sup> Te <sup>m</sup>	7	<sup>133</sup> I	5
<sup>135</sup> I	5	<sup>131</sup> I	5	<sup>131</sup> Te <sup>m</sup>	3
<sup>131</sup> I	5	<sup>135</sup> I	4	<sup>135</sup> I	3
<sup>136</sup> Cs	4	<sup>136</sup> Cs	5	<sup>131</sup> I	2
<sup>137</sup> Cs	2	<sup>137</sup> Cs	2	<sup>136</sup> Cs	2
<sup>99</sup> Mo	3	<sup>99</sup> Mo	3	<sup>137</sup> Cs	2

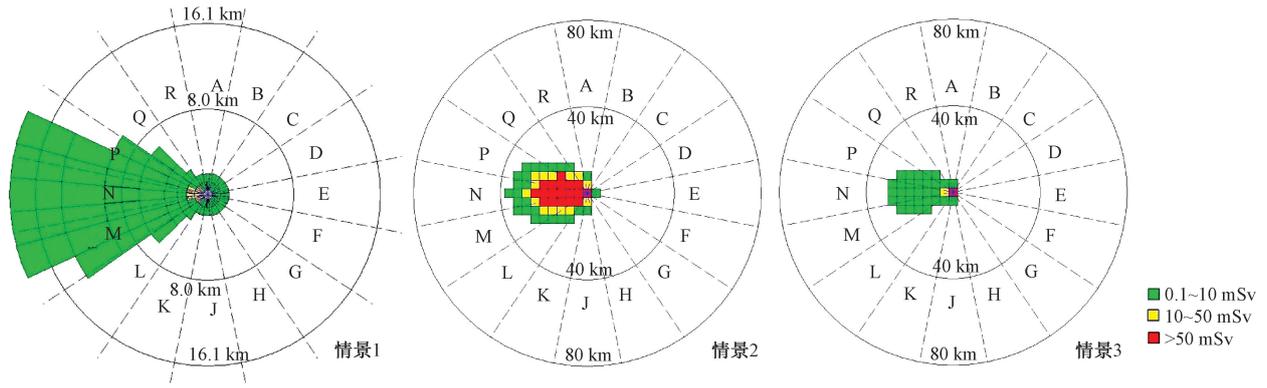
3 种情景下地面沉积外照射剂量在 80 km 区域内变化范围依次为 1.40 × 10<sup>-2</sup> ~ 1.50 × 10、3.70 × 10<sup>-1</sup> ~ 3.00 × 10<sup>4</sup> 和 6.70 × 10<sup>-2</sup> ~ 7.30 × 10 mSv, 见图 2。

3. 不同情景下甲状腺待积剂量: 3 种情景甲状腺待积剂量在 80 km 区域内变化范围依次为 (2.40 × 10<sup>-2</sup> ~ 5.50 × 10<sup>2</sup>)、(2.40 × 10<sup>1</sup> ~ 1.10 × 10<sup>6</sup>) 和 (1.20 × 10<sup>-1</sup> ~ 2.60 × 10<sup>3</sup>) mSv, 见图 3。

### 讨 论

在核电厂发生事故时, 因不同的源项、释放途径及大气扩散条件差异可能会对环境和人体健康造成的影响存在显著差异<sup>[9-11]</sup>。针对 LTSBO 事故时 3 种不同释放途径下放射性核素源项分布特征和照射剂量特征进行比较分析。情景 2 即通过蒸汽发生器传热管破裂释放途径进入到环境中的放射性核素活度最高, 所致公众剂量最高, 情景 1 即当安全壳泄漏或失效时通过安全壳释放途径进入到环境中的放射性核素活度最低, 所致公众剂量最低。

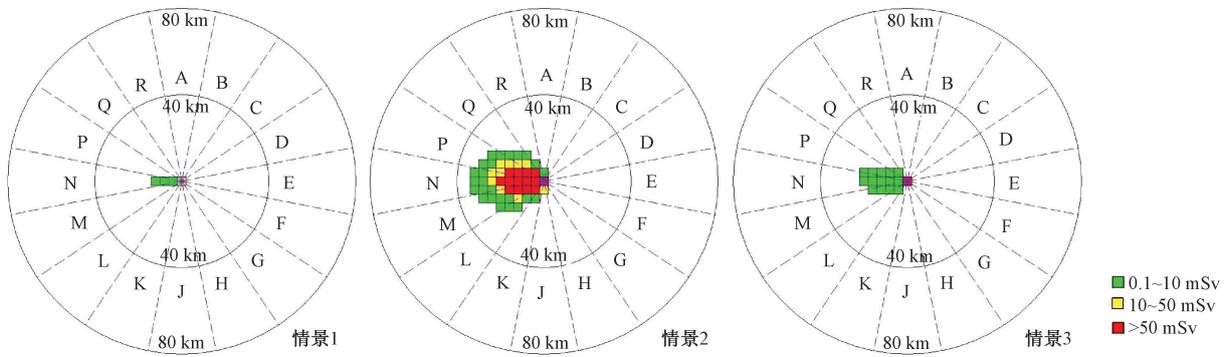
从图 1 可以看出, 不同情景 TEDE 剂量主要分布在释放点 40 km 区域内, 情景 1 和情景 3 两种释放途径下 80 km 范围内大部分扇区 TEDE 剂量在 10 mSv 之内, 情景 2 这种释放途径下大部分扇区 TEDE 剂量大于 50 mSv。情景 1 和情景 3 这两种释放途径下 80 km 范围内大部分扇区地面沉积外照射剂量 < 10 mSv, 情景 2 这种释放途径下大部分扇区地面沉积外照射剂量 > 50 mSv。3 种情景下地面沉积外照射剂量均随距离增加呈下降趋势, 最大值出现在离释放点较近的地方。不同情景下地面沉积外



注:A~R.代表16个不同地理方位

图1 不同情景下不同扇区 TEDE 剂量分布特征

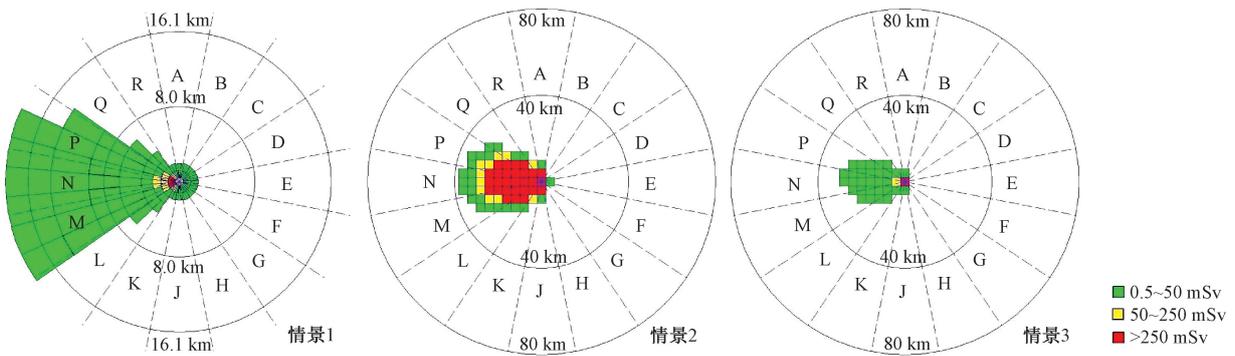
Figure 1 Characteristics of TEDE dose distribution in different sectors under different scenarios



注:A~R.代表16个不同地理方位

图2 不同情景下不同扇区地面沉积外照射剂量分布特征

Figure 2 Characteristics of ground deposition dose in different sectors under different scenarios



注:A~R.代表16个不同地理方位

图3 不同情景下不同扇区甲状腺待积剂量分布特征

Figure 3 Characteristics of thyroid committed dose in different sectors under different scenarios

照射剂量分布范围差异显著,从图2可以看出,情景1地面沉积外照射剂量均主要分布在释放点20 km区域内,情景2和情景3地面沉积外照射剂量均主要分布在释放点40 km区域内,但情景3分布的范围比情景1更广。

3种情景下甲状腺待积剂量均随距离增加呈下

降趋势,最大值出现在离释放点较近的地方。从图3可以看出,情景1甲状腺待积剂量主要分布在释放点20 km区域内,情景2和情景3甲状腺待积剂量均主要分布在释放点40 km区域内,情景1和情景3大部分扇区甲状腺待积剂量在50 mSv之内,但情景3分布的范围比情景1更广,情景2大部分扇

区甲状腺待积剂量大于 250 mSv。

综上,发生 LTSBO 事故时通过蒸汽发生器传热管破裂释放途径进入到环境中的放射性核素活度最高,所造成的公众剂量最高,对公众健康造成的放射性影响最大,因此在核电厂环境影响和公众健康分析时应重点关注 LTSBO 事故时放射性核素通过蒸汽发生器传热管破裂释放途径排放到环境中的后果,明确其对核电厂周围公众健康可能造成的危害。

**利益冲突** 作者无利益冲突,排名无争议。本人与本人家属、其他研究者,未因进行该研究而接受任何不正当的职务或财务利益,在此对研究的独立性和科学性予以保证

**作者贡献声明** 郭瑞萍负责计算结果分析、统计计算、论文起草和最终版本修订;杨春林参与计算结果分析;陈海英参与数据统计计算;张春明协助论文修订

#### 参 考 文 献

- [1] 姚仁太. 核事故后果评价研究进展[J]. 辐射防护通讯, 2009, 29(1): 1-10, 17. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-6356. 2009. 01. 001.  
Yao RT. Review and progresses in studies of nuclear accident consequence assessment[J]. Radiat Prot Bull, 2009, 29(1): 1-10, 17. DOI: 10.3969/j. issn. 1004-6356. 2009. 01. 001.
- [2] Fernandez-Moguell L, Birchley J. Analysis of the accident in the Fukushima Daiichi nuclear power station Unit 3 with MELCOR\_2.1[J]. Ann Nucl Energy, 2015, 83(1): 193-215. DOI: 10.1016/j. anucene. 2015. 04. 021.
- [3] 王韶伟, 侯杰, 陈海英, 等. RASCAL 及其在核事故后果评价中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2014, 34(12): 1411-1415. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934. 2014. 12. 001.  
Wang SW, Hou J, Chen HY, et al. RASCAL and its application in nuclear accident consequences assessment[J]. Nucl Electron Detect Tech, 2014, 34(12): 1411-1415. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-0934. 2014. 12. 001.
- [4] 刘蕴, 张立国, 李红, 等. 应急决策支持系统中核事故后果评价程序的设计与改进[J]. 原子能科学技术, 2014, 48(Z1): 357-361. DOI: 10.7538/yzk. 2014. 48. S0. 0357.  
Liu Y, Zhang LG, Li H, et al. Design and improvement of consequences assessment program for nuclear accidents in emergency decision support system [J]. Atomic Energy Sci Techno, 2014, 48(Z1): 357-361. DOI: 10.7538/yzk. 2014. 48. S0. 0357.
- [5] 施仲齐, 王醒宇. 我国核事故后果评价/决策支持系统开发的状况、要求和建议[J]. 辐射防护, 2003, 23(4): 204-209. DOI: 10.3321/j. issn. 1000-8187. 2003. 04. 002.  
Shi ZQ, Wang XY. Development of the assessment of nuclear accident consequences and decision support system in China: status, requirement and recommendations[J]. Radiat Prot, 2003, 23(4): 204-209. DOI: 10.3321/j. issn. 1000-8187. 2003. 04. 002.
- [6] 胡二邦, 倪东旗, 郝宏伟, 等. 核事故后果评价中剂量与干预评估模式初探[J]. 辐射防护, 2007, 27(1): 6-12. DOI: 10.3321/j. issn. 1000-8187. 2007. 01. 002.  
Hu EB, Ni DQ, Hao HW, et al. Preliminary study of assessment model of dose and intervention in accident consequences assessment [J]. Radiat Prot, 2007, 27(1): 6-12. DOI: 10.3321/j. issn. 1000-8187. 2007. 01. 002.
- [7] Zhao YF, Zhang LG, Tong JJ. Development of rapid atmospheric source term estimation system for AP1000 nuclear power plant [J]. Prog Nucl Energy, 2015, 81(1): 264-275. DOI: 10.1016/j. pnucene. 2015. 02. 008.
- [8] Kang DG, Change SH. The safety assessment of OPR-1000 nuclear power plant for station blackout accident applying the combined deterministic and probabilistic procedure[J]. Nucl Eng Des, 2014, 275: 142-153. DOI: 10.1016/j. nucengdes. 2014. 05. 009.
- [9] Cheng YH, Shih CK, Jiang SC, et al. Improvement of accident dose consequences simulation software for nuclear emergency response applications [J]. Ann Nucl Energy, 2008, 35(10): 1864-1877. DOI: 10.1016/j. anucene. 2008. 04. 007.
- [10] Zheng DQ, Leung JKC, Lee BY, et al. Data assimilation in the atmospheric dispersion model for nuclear accident assessments [J]. Atmos Environ, 2007, 41(11): 2438-2446. DOI: 10.1016/j. atmosenv. 2006. 05. 076.
- [11] Cao JZ, Yeung MR, Wong SK, et al. Adaptation of COSYMA and assessment of accident consequences for Daya Bay nuclear power plant in China [J]. J Environ Radioactiv, 2000, 48(3): 265-277. DOI: 10.1016/S0265-931X(99)00077-6.

(收稿日期:2016-05-26)