

核电厂应急计划区划分中严重事故准则应用方式研究

黄挺,曲静原

清华大学核能与新能源技术研究院,北京 100084

摘要 作为技术准则,核电厂应急计划区的划分需要考虑严重事故序列。在中国相关的国家标准和核安全导则中,提出了对“大多数严重事故序列”和“最严重事故序列”的剂量准则。在实际应用中,对“大多数严重事故序列”和“最严重事故序列”准则的含义存在不同理解。以 WASH1400 压水堆严重事故 PWR1—PWR7 的源项数据作为参考,使用 MACCS 程序对其中的每个源项的后果和全部源项的加权后果进行计算分析,并将这两种不同计算方法的结果对应急计划区大小的影响进行了比较。研究表明,严重事故谱后果的加权结果基本反映了单个事故后果的评价结果,并在一定程度上能够反映应急计划代价的考虑,即以严重事故完整事故谱的加权结果作为确定应急计划区大小的技术准则,能够更好地体现风险缓解和代价之间的权衡原则。

关键词 技术准则;核电厂;应急计划区;严重事故序列

中图分类号 TL48

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.09.002

Application Mode of Severe Accidents Criteria to the Partition of Nuclear Power Plant Emergency Planning Zone

HUANG Ting, QU Jingyuan

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China

Abstract As the technical criteria, it is required that the severe accident sequences should be considered in the partition of nuclear power plants Emergency Planning Zone (EPZ). In the relevant national standards and nuclear safety guide rules, the dose criteria involving ‘majority severe accident sequences’ and ‘the severest accident sequences’ are proposed. However, in the actual applications of these criteria, there might be some different understanding to the concept of ‘majority severe accident sequences’ and ‘the severest accident sequences’. The source terms of PWR1—PWR7 release categories in WASH1400 are selected as the referenced source terms, and the individual consequence of each source term and the weighted average of these consequences are calculated and analyzed by using MACCS code. Then the impacts of the results of two different calculation approaches on EPZ size are compared with each other. The conclusion shows that the weighted average of the severe accident spectrum consequences can basically reflect the assessment results of each severe accident consequence and the consideration for emergency planning cost to a certain extension. This means that using the weighted average of the severe accident spectrum consequences as the technical criteria for the partition of EPZ can better embody the trade-off principle between the risk mitigation and cost.

Keywords technical criteria; nuclear power plant; emergency planning zone; severe accident sequence

0 引言

应急计划区的划分是核电厂应急计划制定中的一个重要的内容,为核电厂的应急计划和应急准备工作提供重要技术基础。1979年,美国核管会发表了报告《州和地方政府用于制定轻水反应堆辐射应急响应计划的基础》(NUREG-0396)^[1],探

讨了应急计划区划分的基础和方法,并确定了相应的技术准则。报告在考虑设计基准事故和严重事故后果的基础上,对大型轻水堆的应急计划区进行了研究。对于严重事故确定了与“大多数严重事故序列”和“最严重事故序列”相关的剂量准则,并且这两条准则均考虑了完整的堆芯熔化事故谱的事

收稿日期:2010-01-10;修回日期:2011-03-04

作者简介:黄挺,博士研究生,研究方向为辐射防护及环境保护,电子信箱:t-huang06@mails.tsinghua.edu.cn;曲静原(通信作者),研究员,研究方向为核事故后果评价、辐射防护、风险评价,电子信箱:qujyuan@tsinghua.edu.cn

故后果以及相应的概率权重。

中国在早期核电厂应急计划区划分研究中,主要参照美国 NUREG-0396 的方法,并结合国内核电厂的具体情况和实践经验,逐步形成了核电厂应急计划区的划分准则^[2]。GB/T 17680—2008 核电厂应急计划与准备准则^[3]中要求同时考虑设计基准事故和严重事故,并且分别针对严重事故中的“大多数严重事故序列”和“后果最严重事故序列”提出了相应的准则,即在烟羽应急计划区之外,所考虑的后果最严重的严重事故序列使公众可能受到的最大预期剂量不应超过 GB 18871^[4]所规定的任何情况下预期均应进行干预的剂量水平;在烟羽应急计划区之外,大多数严重事故序列相应于特定紧急防护行动的可防止的剂量一般应不大于 GB 18871 所规定的相应的通用优化干预水平。

对于上述“大多数严重事故序列”和“后果最严重事故序列”准则,在实际应用中存在不同理解。比如,“大多数严重事故序列”可以理解为严重事故谱中发生概率所占比重较大的事故,“后果最严重事故序列”可以理解为事故谱中放射性释放量具有包络性的某个事故。中国早期核电厂应急计划区的研究中采用了与 NUREG-0396 类似的方式^[5]。如果从不同角度对严重事故准则进行应用,可能会使核电厂应急计划区的划分结果有较大差异。

目前,中国核电处于快速发展时期,新建核电厂尤其是采用先进反应堆的核电厂的应急计划区的研究是十分重要的课题。对应急计划区划分准则的正确理解和应用,是新建核电厂应急计划区研究的前提。为了更加明确严重事故准则中“大多数严重事故序列”和“后果最严重事故序列”的含义,本文参照 NUREG-0396 中所使用的概率论评价方法,使用 MACCS 程序对《反应堆安全研究》(WASH1400)^[6]中的压水堆堆芯熔化释放类 PWR1—PWR7 的每个事故后果和事故谱后果的加权结果进行计算,并将不同计算方法对应急计划区的影响进行比较。

1 研究方法

1.1 概率论事故后果评价方法

核事故后果评价方法一般分为确定论和概率论评价方法。美国 NUREG-0396 报告中对设计基准事故使用了确定论的评价方法,而对严重事故使用了概率论的评价方法。

NUREG-0396 中对严重事故的概率论评价方法为:对于释放类 i , 通过计算距离 x 处的剂量余补累积频率分布 (CCFD) 曲线求得超过指定剂量的气象条件概率 $p_i(x)$ 。若释放类 i 的发生概率为 f_i ,则在距离 x 处,考虑完整事故谱的情况下超过指定剂量的条件概率为

$$p(x) = \frac{\sum_i p_i(x) f_i}{\sum_i f_i} \quad (1)$$

1.2 计算程序

本文选用美国 Sandia 国立实验室 (SNL) 开发的严重事故

风险评价程序 MACCS 进行研究。MACCS 程序共分为 ATMOS, EARLY 和 CHRONC 模块, ATMOS 模块用于处理放射性物质的大气扩散、输送和沉降, EARLY 模块模拟应急阶段的直接照射途径、剂量、缓解措施和健康效应。CHRONC 模块模拟中期和长期阶段的直接或间接照射途径、剂量、缓解措施和健康效应,并计算应急、中期和长期阶段防护行动的经济代价。MACCS 程序的计算流程如图 1 所示^[7]。

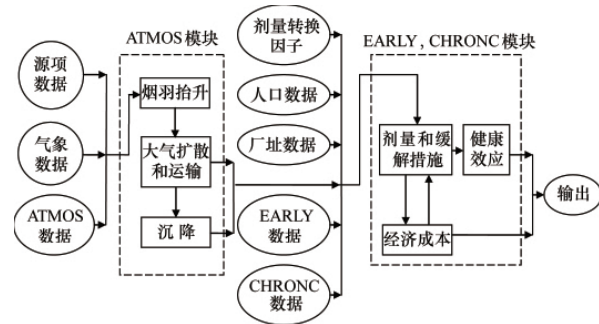


图 1 MACCS 程序后果计算流程

Fig. 1 Flow process diagram for consequence calculation in MACCS

本文主要使用 MACCS 程序中的 ATMOS 和 EARLY 模块,计算各事故的场外个人剂量的 CCFD 曲线,然后根据这些 CCFD 曲线计算个人剂量超过指定剂量的条件概率。需要指明的是,MACCS 程序的计算结果不能输出全身急性剂量,在计算全身急性剂量时一般使用骨髓急性剂量代替。GB 18871 中所规定的任何情况下预期均应进行干预的剂量水平,对全身和骨髓急性照射所采用的剂量一致,因此使用骨髓急性剂量代替全身急性剂量符合国标要求。

2 研究对象和参数选取

2.1 研究对象

美国 NUREG-0396 和中国早期的核电厂应急计划区研究中,对严重事故后果只计算了超过指定剂量条件概率的加权平均值。为了对 GB/T 17680—2008 中“大多数严重事故序列”和“最严重事故序列”两条准则有更全面的认识,选择 WASH1400 中的压水堆严重事故 PWR1—PWR7 作为研究对象,源项数据选取 WASH1400 的研究结果(具体数据参见 WASH1400 报告附件 VI 中的表 VI2-1),依照 NUREG-0396 中的评价方法和 GB/T 17680—2008 的相关要求,分别计算单个事故发生情况下,2d 有效剂量超过隐蔽通用优化干预水平 10mSv, 7d 有效剂量超过撤离通用优化干预水平 50mSv 和 2d 骨髓急性剂量超过 2Sv 的条件概率,以及事故谱的加权结果。

2.2 主要参数选取

MACCS 程序在计算时,涉及到的源项,放射性衰变,大气扩散及沉降,剂量计算等相关参数非常多,一般来说,大部分参数可以采用程序的默认值。一些主要输入参数的取值列于表 1,计算过程中不考虑防护行动。

表 1 主要输入参数

Table 1 Values of some main input parameters

参数名称	参数取值
参考气象数据	山东石岛湾厂址一整年气象观测数据
地表粗糙度/cm	30
湿沉积参数	线性项 7.0×10^{-5} , 指数项 0.8 粒子碘 0.0015, 有机碘 0.0001, 元素碘 0.01, 其他核素 0.0015 (惰性气体不考虑沉降)
干沉积速度/($m \cdot s^{-1}$)	
呼吸率/($m^3 \cdot s^{-1}$)	2.66×10^{-4}
屏蔽因子	烟云 0.75, 地面 0.33, 吸入 0.41
建筑物高度/m	61
建筑物宽度/m	36

3 计算结果和分析

3.1 针对“大多数严重事故序列”准则分析

图 2 给出了 PWR1—PWR7 各事故 2d 有效剂量超过 10mSv 的条件概率及加权平均值,图 3 给出了 PWR1—PWR7 各事故 7d 有效剂量超过 50mSv 的条件概率及加权平均值。PWR1—7 曲线代表事故谱条件概率的加权平均值。图 2 中, PWR1A、PWR1B、PWR2 和 PWR3 的曲线基本重合。图 3 中, PWR1A、PWR1B 和 PWR2 的曲线基本重合。

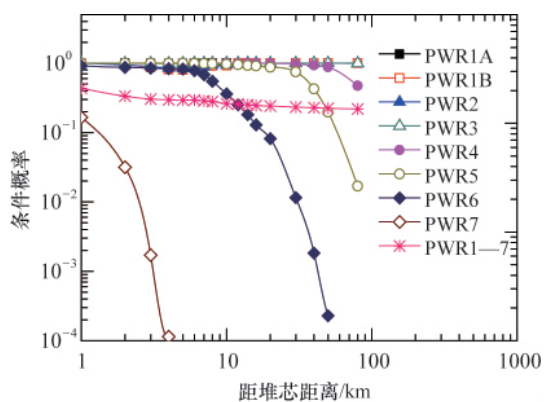


图 2 2d 有效剂量超过 10mSv 的条件概率
Fig. 2 Conditional probability of 2d effective dose exceeding 10mSv

GB/T 17680—2008 中烟羽应急计划区外区和内区的上限为 10 和 5km。由图 2 中 PWR1—7 曲线可知, 事故谱在 10km 处 2d 有效剂量超过 10mSv 的条件概率约为 26%。由图 3 中 PWR1—7 曲线可知, 事故谱在 5km 处 7d 有效剂量超过 50mSv 的条件概率约为 21%。因此, 对于“大多数严重事故序列”准则来说, 并不存在一个精确的概率准则来确定烟羽应急计划区的大小。由于 PWR1—7 曲线随距离的变化十分平缓, 因此, 无论 26% 还是 21%, 这样的概率值对于事故谱后果的加权平均值仅为一个参考值, 是对“大多数严重事故序列”

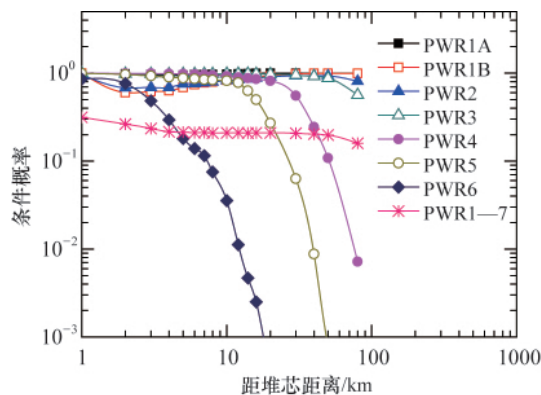


图 3 7d 有效剂量超过 50mSv 的条件概率
Fig. 3 Conditional probability of 7d effective dose exceeding 50mSv

准则的定量描述。

从单个事故看, 可以获得更多的信息。由图 2 可知, PWR1—PWR5 在距反应堆中心很远的距离外, 2d 有效剂量仍有可能大于 10mSv, 且在 10km 以内 2d 有效剂量超过 10mSv 的条件概率始终保持在 1 附近。PWR6 在 10km 处 2d 有效剂量超过 10mSv 的条件概率约为 30%, 并随距离的增大迅速减小, 20km 以内已经降至 1% 以下。PWR7 在 4km 处的剂量已经小于 10mSv。由于 PWR6 和 PWR7 的发生概率占事故谱总发生概率的比例约为 75%, 因此, 如果 PWR6 和 PWR7 在某距离上的 2d 有效剂量超过 10mSv 的概率很小, 那么由式(1)可知, 相应的条件概率加权平均值必然会接近 $75\% \times 0 + 25\% \times 1 = 25\%$ 。由 PWR1—7 曲线可知, 事故谱在 10km 处 2d 有效剂量超过 10mSv 的条件概率为 26%, 这与 25% 相当接近。由此可得, 事故谱 2d 有效剂量在大多数情况下不超过 10mSv 时, 事故谱中发生概率占大多数的事故 PWR6 和 PWR7 的 2d 有效剂量也不超过 10mSv, 两种计算方法本质上是一致的。

由于 PWR7 在任何天气条件下的场外 7d 有效剂量均小于 50mSv, 因此图 3 中没有 PWR7 的曲线。由图 3 可知, PWR6 在 5km 处 7d 有效剂量超过 50mSv 的条件概率仅有 18%, 并随距离的增大迅速减小。PWR1—PWR5 曲线形式与图 2 中基本类似, 因此可以得出类似结论, 即事故谱 7d 有效剂量在大多数情况下不超过 50mSv 与事故谱中发生概率占大多数的事故的 7d 有效剂量不超过 50mSv 在本质上是一致的。

计算结果表明, 在应用“大多数严重事故序列”准则时, 无论考虑完整事故谱还是事故谱中发生概率占大多数的事故(如 PWR6 和 PWR7), 其在本质上并无太大差别。主要原因是 PWR6 和 PWR7 在堆芯熔化事故中的概率权重比较大, 在事故谱条件概率的加权平均值的计算中起主要作用。

3.2 针对“后果最严重的事故序列”准则的分析

图 4 给出了 PWR1—PWR7 各事故 2d 骨髓急性剂量超过 2Sv 的条件概率及加权平均值。可以看出 PWR1B 与 PWR1A 曲线差别较大, 在 10km 以内条件概率明显减小, 这

是因为 PWR1B 源项的释放热量较大,烟羽抬升高度较高,使得反应堆近距离处的个人剂量相对较小。而在较远距离处,烟羽热抬升的影响逐渐减弱,PWR1B 曲线基本与 PWR1A 曲线重合。

PWR6 和 PWR7 由于源项本身较小,任何天气条件下的场外急性剂量均小于 2Sv,因此图 4 中没有 PWR6 和 PWR7 的曲线。由图 4 可知,在 10km 以外,PWR4—PWR7 的急性剂量均小于 2Sv,PWR1—PWR3 对事故谱 2d 骨髓急性剂量超过 2Sv 的条件概率起主要贡献。对于具有包络性的事故 PWR1A 来说,在 10km 处急性剂量超过 2Sv 的条件概率仍保持在一个较高的水平,约 40%,在接近 30km 处才能降至 3% 左右。如果将 PWR1A 视为“后果最严重的事故序列”,那么相应的烟羽应急计划区半径将达 30km。

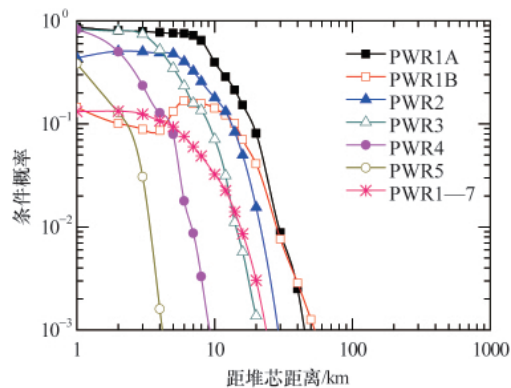


图 4 骨髓急性剂量超过 2Sv 的条件概率

Fig. 4 Conditional probability of bone marrow acute dose exceeding 2Sv

由于 PWR1—PWR3 事故的发生概率在整个堆芯熔事故谱中所占的比例较小,约为 20%,因此根据式(1)可知,概率的权重减弱了 PWR1—PWR3 对事故谱后果的贡献。PWR1—PWR7 事故谱急性剂量超过 2Sv 的条件概率在 10km 处已降至 3%,并且随距离的增加迅速减小。

无论 NUREG-0396,还是国内早期的研究中,对“后果最严重事故序列”准则均应用的是完整事故谱的计算结果,而不是考虑单一的包络性事故,这反映了对应急计划代价的考虑。由上面的计算结果可得,如果考虑包络性的事故 PWR1A,烟羽应急计划区半径将达到 30km,这可能会使应急计划区划分的范围过大而带来不必要的经济负担。而从完整事故谱的后果考虑,则可以通过概率的权重减弱 PWR1—PWR3 的对后果的贡献,从而使应急计划区划定在一个合理的范围内(如 10km)。

此外,对于“后果最严重的事故序列”,由于其可能产生确定性健康效应,因此希望在烟羽应急计划区外,超过威胁生命的剂量(如 2Sv)的条件概率能够随距离迅速减小。由图 4 可以看出,PWR1—7 曲线基本反映了单个事故曲线的变化趋

势。因此,对于“后果最严重的事故序列”准则来说,考虑完整事故谱的评价结果是合适的。

4 结论

对压水堆严重事故谱后果的详细研究结果表明,严重事故谱后果的加权结果基本上反映了单个事故的评价结果。对于“大多数严重事故序列”准则,考虑完整事故谱和考虑发生概率占大多数的事故,其本质上是一致的;对于“后果最严重的事故序列”准则,考虑后果具有包络性的单一事故可能会使应急计划区的划分范围过大而给电厂的营运带来不必要的经济负担,而考虑事故谱的加权后果,则可以通过概率的权重减弱后果较为严重的事故的影响,能够更好地体现风险缓解和代价之间的权衡原则,在此基础上确定应急计划区尺寸更加合理。因此,在应用应急计划区划分中的严重事故准则时,考虑完整事故谱的后果是合适的。

参考文献 (References)

- [1] United States Nuclear Regulatory Commission. NUREG-0396 Planning basis for the development of state and local government radiological emergency response plans in support of light water nuclear power plants [R]. Washington DC: United States Nuclear Regulatory Commission, 1978-12.
- [2] 施仲齐. 确定核动力厂应急计划区大小的准则和方法[R]. 中国核科技报告, CNIC-00705, 1993: 1-19.
Shi Zhongqi. Criteria and approaches to emergency planning zone determination for nuclear power plant [R]. China Nuclear Science and Technology Report, CNIC-00705, 1993: 1-19.
- [3] 中国核工业集团公司. GB/T 17680—2008 核电厂应急计划与准备准则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
China National Nuclear Corporation. GB/T 17680—2008 Criteria for emergency planning and preparedness for nuclear power plants [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [4] 国家标准化管理委员会. GB 18871—2002 电离辐射防护与辐射源安全基本标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
Standardization Administration of the People's Republic of China. GB 18871—2002 Basic standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources [S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [5] 施仲齐, 杨玲. 我国在建核电厂烟羽应急计划区大小的研究和[J]. 核科学与工程, 1992, 12(4): 289-302.
Shi Zhongqi, Yang Ling. Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering, 1992, 12(4): 289-302.
- [6] United States Nuclear Regulatory Commission. Reactor safety study: An assessment of accident risks in US commercial nuclear power plants[R]. Washington DC: United States Nuclear Regulatory Commission, 1975.
- [7] Rollstin J A, Chanin D I, Jow H N. Melcor accident consequence code system (MACCS) [R]. Albuquerque, NM: Technadyne Engineering Consultants, 1990.

(责任编辑 刘志远)