

文章编号: 0258-0926(2016)S1-0135-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.S1.0135

核燃料循环设施洪水设防标准研究

孔庆军¹, 谢茂林², 孙德泉¹, 赵昱龙¹, 王 婧¹

1. 国防科工局核技术支持中心, 北京, 100080; 2. 中国工程物理研究院材料研究所, 四川江油, 621700

摘要: 日本福岛核事故后, 世界各国更加关注外部事件对核设施的潜在影响, 包括洪水对核设施的潜在影响。当前, 国内核燃料循环设施缺乏合理的防洪标准, 不仅阻碍了核设施防洪工作的开展, 也影响了核设施的安全性。本文以核设施潜在风险为基础, 借鉴已有的 4 级核设施危险分类, 依据核设施的重要程度, 根据洪灾造成的经济损失和环境后果, 提出了每一类核设施的洪水设防标准。

关键词: 核燃料循环设施; 洪水设防标准

中图分类号: TL33 文献标志码: A

Study on Flood Control Standard for Nuclear Fuel Cycle Facilities

Kong Qingjun¹, Xie Maolin², Sun Dequan¹, Zhao Yulong¹, Wang Jing¹

1. Nuclear Technology Support Center, State Administration of Science, Technology and Industry for National Defense, Beijing 100080, China;
2. Institute of Material Science, China Academy of Engineering Physics, Jianguo, Sichuan, 621700, China

Abstract: After Fukushima nuclear accident in Japan, all the countries in the world are more and more concerning the potential impact of external events on nuclear facilities, including the potential impact of the flood. However, we are lacking of a reasonable flood control standard for nuclear fuel cycle facilities in China currently, which will not only hinder the flood protection for nuclear facilities, but also affect the safety of nuclear facilities directly. Based on the potential risks of nuclear facilities, referring to the existing four classes of nuclear facilities risk classification, considering the importance of nuclear facilities, economic losses and environmental consequences caused by flood, this paper proposes a flood control standard for each risk categories of nuclear facilities.

Key words: Nuclear fuel cycle facilities, Flood control standard

0 前 言

福岛核事故后, 世界各国更加关注外部事件对核设施的潜在影响, 包括洪水对核设施的潜在影响, 并积极采取应对措施。我国核燃料循环设施大多依河而建, 洪水成为影响核安全的重要外部事件, 从核燃料循环设施运行历史看来, 也多次受到洪水的威胁。为此有必要采取有效的防洪措施, 以确保核设施的安全。

当前国内核燃料循环设施尚缺乏合理的防洪标准, 仅有一些原则性规定。如《防洪标准》(GB50201—2014)^[1]中提出“应采用高于 200

年一遇的防洪标准, 对于核污染危害严重时, 应采用可能最大洪水校核”;在《滨河核电厂厂址设计基准洪水的确定》(HAD101/08)^[2]中仅对核电厂提出了防洪要求。为此有必要根据核设施的重要程度和洪灾造成的潜在后果, 合理地确定洪水设防标准。

本文以核设施潜在危险分类为基础, 结合当前已有防洪标准, 依据核设施的重要程度, 洪灾造成经济损失和环境后果, 提出每一类核设施的洪水设防标准。本研究只限于滨河厂址的核燃料循环设施, 不包括滨海厂址的核燃料循环设施。

收稿日期: 2016-03-24; 修回日期: 2016-04-30

作者简介: 孔庆军 (1979—), 男, 工程硕士, 现从事核安全审评监督工作

1 核设施分类

国际原子能机构 (IAEA) 和美国能源部 (DOE) 分别提出了核设施分类准则。IAEA 主要依据在事故情况下,核设施对公众和环境、工作人员的影响,将核设施分为 4 类,但分类准则非常原则,缺乏可操作性^[3]。DOE 也依据在事故情况下,核设施对公众、环境和工作人员的影响,将核设施分为 4 类;DOE 不仅给出了原则性的分类准则,也给出了量化的分类准则,比较便于操作^[3]。在国内,国防科工局结合国内核设施现状,按照反应堆功率和非反应堆类核设施的放射性物质包容量及潜在风险,发布了设施分类准则,具体见表 1^[4]。在本研究中,将依据国内现有的分类准则,研究制定相应的洪水设防标准。

表 1 核设施分类准则

Table 1 Category Criteria of Nuclear Facilities

类别	分类准则
I	设计功率大于或等于 20 MW 的反应堆 ; 潜在危险相当于设计功率水平大于或等于 20 MW 反应堆的核设施
II	临界装置及设计功率水平小于 20 MW 的反应堆 ; 非反应堆类核设施内易裂变材料的最大存量大于国家标准 GB15146.2 所规定的次临界限值,有可能发生临界事故的设施 ^[5] ; 反应堆类核设施内放射性核素最大存量大于或等于文献 [6]附件 1 中 II 类阈值的设施 ; 非反应堆类核设施内放射性核素组成不清,且混合裂变产物的总活度超过 3.7×10^{13} Bq
III	非反应堆类核设施内放射性核素最大存量大于或等于文献 [6]附件 1 中 III 类阈值且小于 II 类阈值的为 III 类核设施
IV	非反应堆类军工核设施内放射性物质核素最大存量小于文献 [6]附件 1 中 III 类阈值的为 类核设施

注:本文仅讨论核燃料循环设施的洪水设防标准,在此核反应堆仅用于潜在风险和经济损失的对比

2 核设施洪水设防标准建议

2.1 I 类核设施的洪水设防标准

2.1.1 潜在风险 由第 1 节可知,I 类核设施与核电厂的潜在风险水平相当。该类核设施一旦被洪水淹没,将会造成周围环境大面积污染,并会导致工作人员和公众受到超剂量照射。一旦发生该类事故,不仅设施本身的损失很大,而且周围环境恢复的费用将是巨大的,同时也会产生严重的社会政治影响(如福岛核事故)^[6]。

2.1.2 洪水设防标准 由于 I 类核设施与核电厂的潜在风险相当,为此应按照核电厂洪水设防要

求确定其洪水设防标准。对于位于内陆的核设施应按照 HAD101/08^[3]的要求采用可能最大洪水进行设防。并且需要考虑降雨产生的可能最大洪水、可能最大积雪与百年一遇雪季降雨相遇等八类事件或事件的组合,并选取上述事件中的较大者。

2.2 类核设施的洪水设防标准

2.2.1 潜在风险 在 II 类核设施中,无论是反应堆、临界装置,还是包含有大量放射性物质的核燃料循环设施,一旦被洪水淹没后,不仅会导致设施受损、核材料流失,还会导致周围环境受到污染。其直接经济损失粗略估算会有几十亿元左右,具体依据如下:

(1) 一个热功率 20 MW 的反应堆造价在 10 亿元左右。当反应堆被洪水淹没,可能会使放射性物质泄漏到周围环境中。根据以往的环境治理经验,周围环境的清理去污费用高达十几亿元。反应堆本身价值加上周围环境的整治费用,共需要二十多亿元。这还不包括产生的社会和政治影响等间接费用。

(2) 文献 [6]附件 I 中涉及核素种类多达上百种,难以逐个核素估算被水淹没后的损失。以操作钚的设施为代表,估算 II 类核设施被水淹没后造成的损失。钚含量超过 900 g 的设施属于 II 类核设施,按照商业钚的价格计算,900 g 钚价值约 1 亿元。设施一旦被洪水淹没造成钚流失,仅核材料的损失就有上亿人民币。同时由于钚泄漏造成周围环境污染,其环境整治费用也需要十多亿人民币。

(3) II 类核设施包含具有潜在临界风险的设施,即核材料的质量超过了临界限值。具有临界风险的核设施,一旦被洪水淹没将会改变临界控制条件,影响设施的临界控制,增加了临界风险,甚至可能引发临界事故。

2.2.2 洪水设防标准 依据《水利水电工程等级划分及洪水标准》(SL252-2000)^[7]的规定,如果水库大坝失事会影响一个资产在 5 亿~50 亿元的企业,那么大坝应被列为 II 级水工构筑物,其防洪标准应按照 100~500 a 设计,1000~5000 a 进行校核。如果水库大坝失事会影响一个资产大于 50 亿元的企业,那么大坝应被列为 I 级水工构筑物,应按照 500~1000 a 设计、5000~10000 a 或可能最大洪水 (PMF) 校核。

II 类核设施被洪水淹没后造成的损失基本在

5 亿~50 亿元人民币之间，基本上相当于 II 级水工构筑物所要保护的重要企业的经济价值，但是考虑到以下几个因素：

(1) II 类核设施包括热功率低于 20 MW 反应堆。在国内即使是低功率研究堆，一般也是按照最大可能洪水进行设防。

(2) 由于 II 类核设施没有规定放射性物质质量上限值，这使得高放废液贮存设施也可划为 II 类核设施，但该类设施被洪水淹没后的后果是非常严重的。

(3) 针对核设施的防洪，主要是防止洪水越过堤坝进入设施，因此对其开展洪水校核缺乏实质性意义，并且在《堤防工程设计规范》(GB 50286—2013)^[8]中也没有要求进行洪水校核，为此在核设施的防洪中，不再提出校核洪水的要求。

(4) 与其他有洪水次生灾害设施进行类比，如尾矿库。按照《尾矿库安全技术规程》(AQ2006—2005)^[9]的要求，一级尾矿库(贮量 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$)的排洪设施应按照 1000~2000 a 设计，二级尾矿库($1 \times 10^7 \sim 1 \times 10^8 \text{ m}^3$)的排洪设施应按照 500~2000 a 设计，并提出：“贮存铀矿等放射性和有害尾矿，失事后可能对下游环境造成极其严重危害的尾矿库，其防洪标准应予以提高，必要时其后期防洪按照最大可能洪水进行设计”。当前我国最大的铀尾矿库虽从库容的角度属于二级尾矿库；考虑到失事后的风险和对环境的影响，在治理过程中，按照 I 级水工构筑物上限进行设计和校核，即按照 1000 a 一遇进行设计，按 PMF 进行校核。同时，II 类核设施失事后造成的后果不低于我国最大的铀尾矿库失事后造成的后果，为此洪水设防标准也应与之相当。

综上所述，建议 II 类核设施参照 I 级水工构筑物设防标准上限进行洪水设防，即按照 1000~10000 a 一遇洪水进行设防。当设施包含大量易弥散放射性物质(如高放废液或钚粉末)时，将按照上限进行设防；当设施中的放射性物质为难弥散物质(如金属固体)时，或者放射性物质包容量接近 II 类设施阈值时，可按照下限进行设防。

2.3 III 类核设施的洪水设防标准

2.3.1 潜在风险 III 类核设施含有的放射性物质质量低于 II 类核设施，并且没有临界风险。但是，一旦被洪水淹没，不仅会造成设施损坏，而且还

会导致放射性物质泄漏污染周围环境，同时也会产生社会和政治影响。其直接经济损失主要考虑以下几方面：

(1) III 类核设施的 ^{235}U 含量为吨数量级，虽然被洪水淹没后，对环境造成的影响不如钚的影响大，但是损失几吨高浓铀，其经济损失也有几亿人民币。

(2) III 类核设施的钚含量最大为几百克，虽然从核材料的价格来角度仅有 1 亿人民币左右，但是操作钚的设施被淹没，就会导致周围环境受到污染，其周围环境的治理费用也达几亿人民币。这个费用从当前正在实施退役的核设施中也可以得到佐证，甚至还会带来相当的社会政治影响。

2.3.2 洪水设防标准 依据 SL252-2000，如果水库大坝失事会影响一个资产在 0.5 亿~5 亿元的企业，那么大坝应被列为 III 级水工构筑物，其在防洪标准应按照 50~100 a 设计，1000~2000 a 校核。从上一节的分析来看，III 类核设施被洪水淹没后造成的经济损失也达几亿人民币，基本相当于 III 级水工构筑物所要保护的重要企业的经济价值。但是考虑到以下几个因素，III 类核设施应按照 500~1000 年一遇的洪水进行设防。

(1) III 类核设施放射性物质包容量的上限接近 II 类核设施。

(2) 针对核设施的防洪，主要是防止洪水越过堤坝进入设施，因此对其开展洪水校核缺乏实质性意义，并且在 GB 50286—2013 中也没有要求进行洪水校核，为此在核设施的防洪中，不再提出校核洪水的要求。

如果 III 类核设施中的放射性物质为易弥散物质(如钚粉末)，或其放射性物质包容量接近 II 类核设施的阈值时，洪水设防标准应取上限；如果 III 类核设施中的放射性物质是难弥散物质(如金属固体)，洪水设防标准可取下限。

2.4 类核设施的洪水设防标准

2.4.1 潜在风险 由于该类设施的放射性存量较小，即使被洪水淹没，虽然泄漏的放射性物质会污染设施附近环境，但是由于洪水稀释的作用，以至于在核设施下游几公里(到达居民取水口之前)已经是天然本底的水平，对下游环境和公众影响很小，甚至可以忽略，仅设施的构筑物和设备受到损坏，经济损失和环境影响有限。

2.4.2 洪水设防标准 由于该类核设施放射性贮量较小,失事后对工作人员、公众的影响相对较小,但泄漏的放射性物质可能会引起局部环境的污染。考虑到 IV 类核设施包容放射性物质的量上限接近 III 类核设施,同时 GB50201—2014^[1]中提出的核设施至少应按照 200 a 一遇的洪水进行设计的要求。为此,建议 IV 类核设施按照 200~500 a 一遇的洪水进行设防。IV 类核设施中的放射性物质为易弥散物质(如钚粉末等)或其放射性物质包容量接近 III 类核设施的阈值时,其洪水设防标准应取上限;如 IV 类核设施中的放射性物质为难弥散的放射性物质(如金属固体),其洪水设防标准可取下限。

综上所述,建议每类核设施按照表 2 提出的洪水设防标准进行设防。

表 2 核燃料循环设施洪水设防标准

Table 2 Flood Control Standard for Nuclear Fuel Cycle Facilities

设施类别	I 类	II 类	III 类	IV 类
防洪标准 (重现期/a)	PMF	1000 ~ 10000	500 ~ 1000	200 ~ 500

3 结论和建议

本研究是国内首次结合核燃料循环设施潜在风险的大小,提出相应的洪水设防标准,尚未经过工程实践的检验。为此需要将本研究结果贯

彻到工程实际中,以检验本研究提出的洪水设防标准的合理性和可行性。

随着核电快速发展,今后将会在沿海地区新建一批核燃料循环设施,这些设施将会受到海啸、海潮等各种沿海洪水现象的影响,有必要开展滨海厂址的核燃料循环设施洪水设防要求的研究,为核电产业的发展保驾护航。

参考文献:

- [1] GB50201—2014.防洪标准[S]. 2014.
- [2] HAD101/08. 滨河核电厂厂址设计基准洪水的确定[S]. 1989.
- [3] U.S. Department of Energy. Hazard categorization and accident analysis techniques for compliance with DOE order 5480.23, Nuclear Safety Analysis Reports[R]. DOE-STD-1027. Washington, 1997.
- [4] 国防科工局. 军核监[2011]8 号. 国防科技工业军用核设施核安全监管分类办法[S]. 2011.
- [5] GB15146.2—2008. 反应堆外易裂变材料的核临界安全 第 2 部分:易裂变材料操作、加工、处理的基本技术规则与次临界限值[S]. 2008.
- [6] 环境保护部核与辐射安全监管二司, 环境保护部核与辐射安全中心. 日本福岛核事故[M]. 北京: 中国原子能出版社, 2014.
- [7] SL252—2000. 水利水电工程等级划分及洪水标准[S]. 2000.
- [8] GB 50286—2013. 堤防工程设计规范[S]. 2013.
- [9] AQ2006—2005. 尾矿库安全技术规程[S]. 2005.

(责任编辑:张祚豪)