

# 核电站安全的地震威胁及对策分析

周福霖, 谭平, 刘德稳

(广州大学减震控制与结构安全国家重点实验室(培育), 广州 510405)

**[摘要]** 核能是一种清洁高效的无碳能源,在人类文明进程及世界现代化发展中具有重要意义,但也存在核泄漏和核废料等问题。对世界核能利用情况及各国核电站建设与规划情况进行了回顾与展望,总结了历史上历次核电站事故发生的根本原因,着重探讨了地震对核电站的威胁。以2011年日本大地震造成的福岛核电站事故为例,分析了核电站事故对社会、经济及生态环境造成的影响,同时还提出了一些建议:对已建核电站进行抗震加固和延寿评估,做好未来核电站建设规划,改善管理机制,做好地震预警及核电站安全监测,优化应急处置机制,深化核能概率安全分析,普及群众安全教育,定期开展灾难演习,强化国际合作等举措,为人类在探索正确使用核能的进程中少受核能副作用的伤害而发挥重要作用。

**[关键词]** 核电站;地震危险性;海啸;选址安全;隔震;消能;三维隔震

**[中图分类号]** TM623.8 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 109-1742(2013)04-0036-05

## 1 前言

核电能源是人类改造自然、利用自然的一种清洁高效的能源,核能发电不像化石燃料发电那样排放巨量的污染物质到大气中,不会产生加重地球温室效应的CO<sub>2</sub>。1 g铀所释放的核能相当于3 t煤或2 000 L石油所产生的能量,因此世界很多国家都积极推广应用这种能源。积极发展核电是我国能源的长期重大战略选择,它将成为我国清洁能源长期发展的一个重要支柱。目前我国核电装机容量 $9.1 \times 10^6$  kW,仅占全国总发电量的2%,与全球核电国家平均17%(其中,有17个国家的核电在本国发电量中比例超过25%)相比有很大差距,根据预测,我国2020年的核电装机容量将比目前增长9~10倍,预计未来20~30年,核电站将在我国各地区成批兴建。然而,科技本身就是一把双刃剑,核能虽为无碳能源,但也存在核泄漏、核废料等隐患。近些年地球地震活动频繁,若引发核电站核泄漏事故甚至灾难,将对社会、经济、生态环境等造成严重后果。2011年日本“3·11”大地震引发的福岛核电站事故再次给人们敲响了警钟。本文通过回顾历次由地震引发

的核电站事故从中总结经验教训并找出积极的对策,以期能在人类安全利用核能的探索中起到借鉴作用。

## 2 地震引发的核电站灾难事故分析及经验教训

造成核电站事故的原因主要有有人为原因和自然灾害原因。历史上由于人为原因引发的核电站事故如1979年美国三里岛核事故、1986年前苏联切尔诺贝利核事故。前苏联切尔诺贝利核电站事故导火线是操作失误,但是其设计方案的落后、没有安全壳,压力管式石墨慢化沸水反应堆的设计缺陷,尤其是控制棒的设计问题是导致事故的根本原因,核电站周围地区的土壤中至今依然存在这种放射性物质。美国三里岛核电站事故的直接原因是设备机械故障和运行人员的操作错误。由于地震引发的事故虽然不多,但给人的警示作用却十分重大。地震引发的核电站事故包括2007年7月16日日本新潟县发生的里氏6.8级地震,引发柏崎刈羽核电厂多个装有放射性废料的罐子倾倒、含放射性物质的水泄漏等事故;2011年8月下旬美国东部弗

**[收稿日期]** 2013-01-30

**[作者简介]** 周福霖(1939—),男,广东汕头市人,中国工程院院士,教授,博导,从事结构减震控制研究工作;E-mail:zhoufl@cae.cn

吉尼亚州发生里氏5.8级地震,撼动整个东海岸,震中附近一座核电站失去外部电源,反应堆紧急停机,另外12座核电站出现异常;2011年3月11日日本东北部海域发生里氏9.0级大地震,同时引发巨大海啸,使得福岛核电站多个机组发生停堆,强震使得核电站外电网中断,同时应急柴油发动机也因为海啸丧失功能,所有电源中断,冷却功能失效,内部燃料过热熔毁,发生爆炸,造成核泄漏,产生辐射和放射性副产品。福岛核电站辐射物质泄漏最终定性为7级核事故,此次核电站事故给人们带来了受到核辐射的担忧,福岛将经历长期低强度辐射。灾难重创当地经济,使居民生活受到极大影响。

从以上事故可以得到以下经验教训。

1)地震和海啸是对核电站威胁最大的自然因素,人类还未能完全应对地震对核电站和人类造成的威胁,技术仍有很大的提升空间。土木工程、材料科学、环境工程等学科的发展都能促进人类建设地震威胁下更安全的核电站。

2)不科学的管理方式存在着巨大的安全隐患,从而影响到核电站的安全。欧洲、美国等发达国家都非常重视这方面的思考和研究。

下面将从技术对策和管理对策两个方面阐述如何保证核电站在地震等灾害下的安全。

### 3 核电站地震安全的技术对策

#### 3.1 核电站工程选址抗震安全

地震具有极大的随机性和不确定性。人类对地震的发生机理还没有完全掌握,因此核电站不能建在地震不利地段,包括有活动断层、滑坡、液化、淤泥等地质不稳定区域,以及容易受海啸影响的海拔高度较低的海边。断层活动具有可变性、新生性和潜伏性。世界各国在进行核电厂选址方面都是尽量避开潜在地震多发地带,如美国的核电站建在东部的数量远多于建在西部的数量。我国在选址安全上规定:核电站选址应远离地质断裂带,建在稳定整体基岩上。如大亚湾核电站20 km内没有断裂带,5 km范围内没有发生过大地震。

#### 3.2 核电站抗震设防要求和标准要求

国际上存在两个概念,即运行基准地震(OBE)和安全停堆地震(SSE)。运行基准地震水平是核电站使用期间可能预计到的最大地震,安全停堆地震水平是核电站场地内最大的可能地震。近年来国际学者对安全停堆地震更加重视。同时,根据对保

证放射性及核安全的重要性,美国、日本等国及国际原子能机构(IAEA)把建筑物及系统划分为3个抗震级别:第一类为建筑物及系统、设备及单元,其损坏会造成放射性物质溢出,对居民健康及环境造成威胁。它包括反应堆、第一回路、事故冷却系统、反应堆控制系统、控制棒传动装置、核废料传输及存放系统及容纳这些系统的建筑物;第二类为与少量放射性物质相连的核电站系统单元,如实验室、特殊清洗室等;其余为第三类。第一类单元在运行基准地震时要保持完整的工作能力以及不降低安全性,在安全停堆地震时应保证电站安全性。第二类单元在运行基准地震时应保持工作能力,在安全停堆地震时无放射性物理外泄。第三类单元应符合非核工程要求。

美国、日本、欧洲的多个国家等都有各自不同的抗震设防标准,如美国1973年的RG1.60地面设计反应谱<sup>[1]</sup>,1997年的RG1.165<sup>[2]</sup>,2007年的RG1.208<sup>[3]</sup>,日本JAEG4601<sup>[4]</sup>等,设防标准要求逐步提高。目前世界核电站抗震设防地震动多为0.2~0.3g,少数大于0.3g,极个别大于0.6g。我国以往多采用RG1.60谱,目前设计的CPR1000核电站,采用RG1.60修正谱,其设计运行安全地震地面震动限于0.2g以下。

#### 3.3 核电站隔震保护的研究应用

核电站采用传统抗震技术,结构嵌固在基础上,地震时上部结构及设备装置的地震反应会放大2倍以上。这种“硬抗”手段,在突发强地震中,可能造成结构损坏或设备装置倒塌,因此设计时要限定较小的地面震动值(如我国CPR1000限于0.2g),这就埋下了在突发强地震中的安全隐患。若在类似汶川、玉树等原属中低烈度地震区(设计地震动为0.10~0.15g)突发强地震,对核电站的后果是不堪设想的。核电工程技术复杂,核电的批量化、规模化发展,将对其安全性提出更高的要求。我国国土面积60%~80%以上处在地震区,地震危险性预测存在不确定性。如何确保核电站在突发强地震中的安全,避免后果不堪设想的地震核灾难,已成为亟待解决的重要课题。

当核电站采用隔震设计方案时,具有满足提高其抗震性能要求的优势,因此隔震核电站的设防目标将会高于按传统抗震技术设计的核电站。若采用新的隔震技术,在基础和上部结构(及设备装置)之间设置柔性隔震层以隔避地震动,能使上部结构

或设备装置的地震反应降为传统抗震结构的  $1/4 \sim 1/12$ , 即安全性成倍提高。基础隔震技术能够大大减小核岛、指挥中心等重要结构和重要设备的地震作用, 使地震输入能量大部分消耗在隔震层, 从而有效实现核电站在突发强地震中的安全; 世界上目前有各种类型隔震建筑 9 000 余座, 其中我国有约 3 000 座。中国、日本、美国、新西兰等国在隔震减震领域进行了大量的研究和工程应用, 建造了一批著名的隔震建筑并且在地震记录下发挥了良好的减震性能, 如美国加州救灾指挥中心等。我国近年来隔震技术应用呈上升趋势。人类虽然有着丰富的隔震设计的经验, 但是应用到核电站方面还不是很多。

法国是世界上最早将隔震技术应用到核电领域的国家, 世界上最早的 3 座隔震核电站就是由法国设计建造的。尽管从现在看来技术比较陈旧, 但是仍然对隔震技术在核电站的应用起到很好的推动作用<sup>[5]</sup>。日本在核电站方面也做了大量工作, 但是几乎未进行实际的工程应用<sup>[6]</sup>, 美国在理论、试验和应用方面都付出了很多努力, 在他们的先进液体金属反应堆 (ALMR) 项目中引用了隔震技术并作了试验, 并在钠先进快速反应堆 (SAFR) 设计中应用了隔震技术<sup>[7]</sup>。美国核管制协会 (NRC) 也慎重地指出, 为确保安全, 将隔震技术应用到核电站还有大量工作要做<sup>[8]</sup>。此外, 英国的 Tomess Heysham 核电站也采用了基础隔震设计。新西兰、韩国等国家也进行了相关研究。目前各国核电厂的隔震主要以水平隔震为主, 而影响很大的竖向震动隔离尚未完全解决, 日本等国的学者在三维隔震方面进行了卓有成效的研究<sup>[9, 10]</sup>。另外, 各国正制订宏大计划, 投入大量人力和资金进行研究, 已取得一些重要成果。

将隔震技术应用到核电站领域是非常有前途和高效的, 我国正抓紧进行该方面的研究, 并正在进行一些试点工程。同时, 为评估地震对核电厂内设备的威胁程度, 对楼层反应谱的研究一直在深入开展中<sup>[11]</sup>, 包括水平反应谱和竖向反应谱。采用水平隔震技术如叠层橡胶支座、滑动摩擦支座能够减小设备的水平地震作用, 采用三维隔震技术如空气弹簧、螺旋弹簧等能够使重要设备避开竖向共振区域, 减小竖向地震对重要设备的破坏。另外, 也可以采用局部隔震技术如轨道式隔震台等来保护核电站的系统。核电站中有很多不同类型的设备部件, 其抗震级别也差别较大, 以后有必要对反应

堆的工艺、设备、重要构件与连接部位都进行抗震分析。

### 3.4 核电站管道支吊架系统与地下管道保护对策

在核电站中有大量的管道支吊架系统, 其质量的好坏与核安全密切相关。管道的连接和支座处是刚度突变的地方, 而且在地震时管道两端常常不会同步振动, 因此很容易产生应力集中而发生破坏。可以研究管道支吊架系统的隔震减震方案与柔性支承方式, 对管道-支吊架系统采用隔震减震装置的位置与数量进行一体化优化研究。

除此之外, 还应关注设备管道的流固耦合、断裂等性能。核电站管道不同于其他的一般性管道, 其发生破坏所产生的后果是极其严重的, 尤其是地下管道, 处于非常复杂的环境当中, 对其性能的研究涵盖了固体力学、流体力学、断裂力学等大量学科, 因此考虑流固耦合、断裂性能等研究被逐步开展, 考虑横波及纵波作用时地基与管道的相互作用, 并在此基础上提出核电站地下管道的隔震减震措施与建议。

### 3.5 保护核电站地震安全的其他技术措施

除了传统的核电站抗震措施和有待深入应用的隔震减震等措施, 下列研究仍具有重要意义。

1) 随机振动分析。地震是典型的振幅及频率非平稳的随机过程, 以往的时程分析作为一种确定性分析, 并不能完全解释核电站在概率性地震作用下的安全。随机振动分析作为一种有效的研究手段, 在未来核电站地震安全的研究中可以预见其重要性会进一步加强。

2) 地震波动动力学。核电站设计地震动的确定是核电站抗震设计的基础, 人类还远没有掌握地震发生机制和传播规律等震源机制的复杂性, 需综合考虑震级、震源机制、震中距、地形、土壤状况多种因素, 这使得确定核电站的设计地震动非常复杂, 需要地震学家、地质学家、结构学家、地球物理学家等共同努力, 还有很长的路要走。

3) 土-结构相互作用 (SSI)。核电站厂房中的安全壳一般刚度较大、周期较小, 尤其在软土地基下需要考虑土-结构间相互作用的影响才能得到相对准确的分析结果。

4) 主动/半主动控制、智能控制。以往核电站大多以抗震和少量的被动控制为主, 在其他行业中如航天、机械中发展较快应用较广的主动控制、半主动控制、智能控制等先进控制技术有望被应用到核

电站中更好地为人类服务,但前提是必须经过可靠的理论和试验验证及可行性研究之后,方可应用。

5)应对海啸和风暴潮。地震会给核电站带来灾难,地震引发的海啸同样是一种灾难,如海啸是日本福岛核电站电力损毁、无法冷却、造成泄露事故的一个重要的原因,因此海域工程配套设施和防护措施应继续纳入更多的考虑之中,如防波堤的建设等;对于来自水文方面的危险性,由于我国东南沿海属于台风频发地区,在确定设计基准洪水时风暴潮也被考虑为是最重要的洪水事件,其发生概率往往低于海啸,因此也值得开展研究。

6)抗震加固和核电站延寿问题。当人们的焦点关注在新建核电站的安全性能时,对已建核电站的安全评估和监测亦不能忽略。当有必要时,可以对其进行抗震加固等措施。世界范围内有很多核电站面临使用期限到期的情况,如果要求其继续使用,需要全方位的评价及考量核电站延寿问题。抗震加固有多种措施,有很多已经成功应用,核电站的抗震加固可以参考普通结构的抗震加固方法或隔减震措施,并考虑提高标准。

7)抗爆研究。核电站有很多防护屏障来保证危机情况下的安全,如安全壳作为最后一道屏障,能够预防爆炸作用下的核泄漏,但爆炸作用威力极大,核电站对于爆炸作用下的性能表现值得关注,因此对抗爆的研究工作也是下一步的课题之一<sup>[12]</sup>。

8)内陆核电站。世界范围内核电站处于沿海的居多,理由是水源丰富和对人类威胁面积低,但是仍有很多处于内陆的核电站,我国在这方面更应该多吸取欧洲各国和美国等国的成功经验,服务国内。

9)地下核电站。为应对地震和军事等其他威胁,有专家提出建造地下核电站的建议,我国已有成功建造地下水电站的经验,但核电站不同于地下水电站,设备工艺复杂,任何一点疏漏就可能造成严重后果,因此,建造地下核电站作为一种方案,还有大量的问题需要深入研究。

#### 4 核电站地震安全的管理对策

配合以上的技术对策,良好的管理对策也能大幅度提高核电站的安全保证。

1)提高核安全重要性的认识,普及群众安全教育,定期进行灾难演习。核安全无小事,核安全是核电发展的前提和基础,核安全是核电发展的生命线,核安全是国家安全的重要组成部分,这些理念

必须深入人心,并落实到实际工作当中。

2)做好对核设施的综合安全检查和核安全规划的编制工作。对已建成和在建核电站的安全检查,包括建筑、工艺和设备本身的抗震能力、抗震措施方面的内容,并且必须及时进行抗震加固或者采取隔减震处理,或者增加多道设防。

3)进一步完善管理监督体系、保障应急动力能源,完善灾害产生后的应急体系等。完备的管理体系可以保障突发事故后的紧急处置能力,进一步减小损失和伤害。

4)做好地震预警及核电站安全监测。地震预警能够进一步在可能范围内减小可能发生的核电站事故对人类造成的危害,而地震安全检测能够保障核电站的安全运营。

5)深化核能概率安全分析(PSA)。借助于数学概率的手段来科学管理核电站的安全。

6)核废料处理。核废料将对后代的生活及健康造成影响,目前各国都积累了一些处置核废料的经验,核废料的处理工作值得深入开展。

7)强化国际合作,充分共享各方的经验和能力。中国大力提倡各国核安全监管机构之间,各国之间加强经验和能力共享,定期组织国际交流等。

#### 5 结语

重视工程技术的进步,在原有抗震措施的基础上,鼓励采用新型的隔震减震措施,采用科学的管理能够更好地保证核电站在地震灾害下的安全。正确利用核能,保障核电站在地震作用下的安全,是人类将长期面对的问题。人类在大自然面前是渺小的,利用自然为人类更好地服务,路还非常漫长,尊重科学就是尊重自然,只有用科学的态度和手段,才能更接近自然,才能更好地促进人类文明的发展。

#### 参考文献

- [1] U.S. NRC. RG1.60 Rev.1: Design response spectra for seismic design of nuclear power plants[S]. U. S. NRC, 1973.
- [2] U.S. NRC. RG 1.165: Identification and characterization of seismic sources and determination safe shutdown earthquake ground motion[S]. U. S. NRC, 1997.
- [3] U.S. NRC. RG 1.208: A performance-based approach to define the site-specific earthquake ground motion[S]. U. S. NRC, 2007.
- [4] U.S. NRC. NUREG/CR-6241 (1994): Technical guidelines for seismic design of nuclear power plants [S]. Translation of JEAG 4601-1987.
- [5] Argonne National Laboratory. On the French nuclear industry

- experience in the design of Seismic isolation of nuclear power plants[R]. U.S. Department of Energy, 1989.
- [6] Fujita T. Progress of applications, R&D and design guidelines for seismic isolation of civil buildings and industrial facilities in Japan[C]// International post-SMiRT conference seminar on seismic isolation, passive energy dissipation and active control of seismic vibrations of structures, Taormina Italy, 1997.
- [7] Clark P W, Aiken I D, Kelly J M, et al. Tests of reduced-scale seismic isolation bearings for the advanced liquid metal reactor (ALMR) program[C]// ASME Pressure Vessel and Piping Conference, Honolulu Hawaii USA, 1995.
- [8] US NRC. Use of seismic base isolation for nuclear structures [C]// NRC Public Meeting, Rockville MD USA, 2004.
- [9] Kageyama M, Iba T, Somaki T, et al. Development of cable reinforced 3-dimensional base isolation air spring[C]// Canada: ASME PVP, 2002.
- [10] Inoue K. Development of three-dimensional seismic isolation technology for next generation nuclear power plant in Japan[C]// U.S: ASME PVP, 2004.
- [11] Pentti Varpasuo. The development of the floor response spectra using large 3D model[J]. Nuclear Engineering and Design, 1999, 192: 229–241.
- [12] Huang Y N, Whittaker A S, Luco N. Performance assessment of conventional and base-isolated nuclear power plants for earthquake and blast loadings[C]// MCEER-08-0029, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York, Buffalo, NY, 2008.

# The earthquake threat and countermeasures to the safety of nuclear power plants

Zhou Fulin, Tan Ping, Liu Dewen

(The State Key Laboratory for Seismic Control and Structural Safety (Cultivation base), Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

**[Abstract]** Nuclear energy is a carbon-free, clean and efficient energy. It is very important in the progress of human civilization and modern development of the world. However, there are still some problems such as nuclear leak and nuclear waste. In this paper, the world's nuclear energy utilization and nuclear power plant constructions are reviewed and plans are forecasted. The basic reason of previous nuclear power plant accidents in history is summarized. Taking 2011 Tohoku earthquake -fukushima nuclear power station accident as an example, threats to the nuclear power plant by earthquake are investigated and impacts on social, economic and ecological environment caused by nuclear power station accident are analyzed. This paper drew lessons from previous accidents and put forward a variety of countermeasures which are from both the technical and management aspects. This paper also put forward some suggestions. Security measures of the existing nuclear power plants should be assessed carefully. The long-term construction plan of the nuclear power plant should be improved. In addition, emergency management mechanism of the nuclear power plant can be enhanced in the future. The earthquake monitoring and earthquake early-warning system is critical and promoted to be established widely. The nuclear probability safety analysis (PSA) could be investigated in depth. The security education of the public should be continuously popularized and disaster drills be carried out regularly. International cooperation and communication are also advocated to be strengthened. All these measures can be significant in human process to explore nuclear energy correctly. We also appeal people all over the world to respect the nature, enjoy the nature, and to create and enjoy the new civilization of human beings.

**[Key words]** nuclear power plant; seismic hazard; tsunami; location safety; base isolation; energy dissipation; three-dimensional base isolation