

# 福岛核电站事故的影响与思考<sup>\*</sup>

吴宜灿

(中国科学院等离子体物理研究所 合肥 230031)

**摘要** 本文在简要回顾日本福岛核电站事故进程的基础上,重点分析了引起事故的主要原因以及事故对核电站本身、周边环境、公众健康和社会的影响,并就事故对我国核电技术选择、核安全管理、核能发展战略、核安全文化与教育等方面的影响进行了思考与分析。

**关键词** 福岛核事故,原因与后果,启示与思考

DOI:10.3969/j.issn.1000-3045.2011.03.004



中国科学院



吴宜灿研究员

## 1 福岛核电站事故进程回顾

日本福岛核电站是目前世界上最大的核电站之一,由福岛一站、福岛二站组成,共有 10 台机组

(一站 6 台,二站 4 台)。福岛一站的核反应堆均为沸水堆,由美国通用电气公司(GE)设计,东京电力公司负责运营,于上世纪 70 年代先后建成投入运行,属于第二代核电技术的反应堆<sup>[1]</sup>。

2011 年 3 月 11 日,日本东海岸发生 9

级强烈地震并引发了海啸。地震发生时,福岛第一核电站的 1、2、3 号机组正在运行,4 号机组正在换料大修,5、6 号机组正处于定期停堆维修状态。地震发生后,反应堆实现自动“停堆”。由于地震摧毁了外部电网,备用柴油发电机启动为应急冷却系统供电以排出余热。但随后地震引发的强海啸淹没了柴油机厂房,核电厂失去了全部交流电源,无法为堆芯提供冷却水,堆芯余热无法排出。压力容器内的水大量蒸发,燃料组件逐渐裸露出水面,包壳开始熔化。燃料棒的锆合金包壳与高温水蒸气发生反应,产生大量氢气。同时,由于燃料包壳破损,放射性核素(如碘-131 和铯-137 等)从燃料棒中逸出。

为防止安全壳超压失效,1、2、3 号机组安全壳泄压阀门先后被开启泄压,氢气伴随着部分放射性物质释放到反应堆上部维修厂房,先后发生了氢气爆炸,导致放射性物质释放到环境中。而 4 号机组的乏燃料池由于无法冷却,导致卸出的燃料包壳熔化发生锆水反应产生氢气而引发火灾,部分放射性

<sup>\*</sup> 先进核能研究(FDS)团队其他成员对本文的调研、分析和撰写做出了重要贡献  
收稿日期 2011 年 5 月 3 日

物质外泄。随后,利用消防水管、直升机、消防车等向反应堆和乏燃料池注入海水冷却,这也致使反应堆及汽轮机厂房地坑内积累了大量放射性废水。3月22日,外部电源恢复后采用淡水对反应堆进行循环冷却,机组状态趋于稳定。4月6日,日本政府批准东京电力公司向海水中排放了1万余吨超标500倍的放射性废水。4月12日,日本原子能安全保安院宣布,福岛第一核电站泄漏的放射性活度达到 $3.7 \times 10^{17} \text{Bq}$ ,将此次核事故等级定为7级<sup>[2]</sup>。

福岛第二核电站在地震发生后自动停堆,并于3月15日达到冷停堆状态,此次事故被日本原子能安全保安院定义为3级。

## 2 事故原因分析

纵观本次福岛核电站事故的进程,可以说导致目前堆芯熔化和放射性物质大量外泄的主要原因是极端外部事件及其叠加效应,同时早期反应堆设计理念存在缺陷和后续人为处理不当也加重了事故后果。根据目前各类报道中获得的信息,从以下3个方面对事故主要原因进行简要分析:

### 2.1 自然因素:强海啸远超设计标准

为确保核电站的安全,在反应堆设计建造时设置了一系列安全设施,用来实现紧急停堆、排出堆芯余热以及包容放射性物质。如果实现了这三条原则,即使发生事故,也不会对环境造成影响。地震发生后福岛核电站实现了紧急停堆,并及时启动了应急堆芯冷却系统,安全壳保持完好而没有出现放射性物质外泄。但随后到来的海啸摧毁了为应急冷却系统提供电力的柴油发电机,堆芯由于余热无法排出而熔化。第一核电站厂区应急柴油发电机位置高度为13米,而海啸到达厂区时高度约14米,这一情况直接导致了应急柴油发电机厂房被淹<sup>[3]</sup>,柴油发动机停止工作,造成失去厂内外所有交流电源而

使堆芯由于得不到及时冷却而熔化,显然远超设计标准的海啸是此次福岛核电站事故的主要原因之一。同时,9级地震及海啸对周边地区交通、电力等基础设施造成的严重破坏导致厂外电源直到地震后10天才恢复<sup>[3]</sup>,恢复时间之长也远远超出设计考虑。

### 2.2 技术因素:设计方案和理念存在缺陷

现代核电站设计中主要考虑的事故包括设计基准事故和超过设计基准的严重事故,对前者要按确定的准则设计应对性措施,对后者则要认真考虑事故后果缓解措施。福岛第一核电站采用美国最早的商用核电站技术<sup>[4]</sup>,其设计与建造完成于美国三里岛核电站事故之前,当时对严重事故以及复杂事故序列还没有清晰的认识,预防和缓解严重事故的安全措施不足。例如采用的干湿井分开的MARK-I型安全壳设计是有争议的<sup>[5]</sup>,其干井体积过小升压迅速,氢氧复合系统不够完善,最终导致了厂房顶部的氢气爆炸。事实上,从上世纪80年代开始,美国已对本国采用MARK-I型安全壳设计的沸水堆进行了一系列的安全改造,例如添加备用柴油机和移动式水泵、添加更多的备用电池、强化湿井结构等措施。在后来设计的先进沸水堆核电站中采用了空间更大的一体化安全壳设计<sup>[6]</sup>。另外作为早期的第二代堆技术,福岛核电站堆芯应急冷却系统必须依赖交流电源才能工作,最终也因备用发电机的破坏导致堆芯熔化。

### 2.3 管理因素:运营公司核安全文化差、政府监管及应对不力

东京电力公司作为日本最大的私营核电企业,在处理本次事故时表现出犹豫、慌乱、效率低下与缺乏专业素质,将电站延寿和恢复发电而不是安全作为事故处理措施的首要考虑因素。例如:在同时面对电网全面瘫痪和应急柴油机无法工作,而且修复时

间不可预料的情况下,未断然采取积极措施(如在第一时间向堆芯注入海水)对堆芯进行有效冷却,最终导致堆芯熔化和大量放射性物质外泄的后果,说明公司对事故严重程度估计不足而心存侥幸;1号机组厂房氢气爆炸破坏后,公司虽判断出是发生了氢气爆炸,但没有能及时采取预防措施、从而未能预防并阻止其他机组的连续类似氢爆事故发生;在测量2号机组内积水的放射性活度时,前后两次数据结果竟然相差上百倍,说明了公司工作人员技术素质不够。事实上,东京电力公司在之前的核电厂安全运行管理上就存在不规范,曾多次篡改安全记录,并隐瞒了该公司1978年发生过的核反应堆事故,也证明了运营公司总体上安全意识和专业素质薄弱。

另外,1号机组到2011年初已运行40年,已到退役时间,但东京电力公司为了追求经济利益申请将机组延寿,政府监管部门面对这样一个安全运行记录有前科的公司,并没有严格要求其对机组进行全面的安全检查和整改就同意其延寿运行,留下了安全隐患。事故发生后,日本首相要求负责核电站运行的运营公司全权负责事故的处理与抢救工作,日本自卫队等外界力量开始并未参与到救援工作中来,之后虽参与进来但对救援工作所起作用十分有限。更为严重的是,日本政府未事先向国际社会与周边邻国通报,就批准运营公司向海里排放上万吨超标500倍的放射性废水,违反了核安全国际法律和制度。

### 3 事故后果分析

福岛核电站事故的影响是多方面的。以下简要阐述一下截至目前事故对环境、公众健康以及社会经济的影响。

#### 3.1 对电站自身的影响

由于事故处理过程中向反应堆注入了

海水进行冷却,对反应堆主要部件造成腐蚀,各受损机组重新启用的可能性已经微乎其微,东京电力公司董事长在接受媒体采访时也表示,废弃1—4号机组可能是唯一选择。4月17日,东京电力公司公布了事故处理计划时间表,表示使事故反应堆及乏燃料池完全冷却需要大约6—9个月时间,而用钢筋混凝土对反应堆进行封盖处理可能将成为防止放射性物质长期扩散的最终处理方式,而废弃反应堆的相关处理费用巨大,具体数额目前尚无法估计。

#### 3.2 对环境的影响

在事故发生后的3月15—17日和22—23日,福岛电站周边的辐射剂量出现了短暂的峰值,到3月23日之后,随着反应堆状态的稳定,电站周边的辐射剂量率逐渐下降。据4月29日日本文部科学省公布的剂量检测结果<sup>[7]</sup>,福岛第一核电站20km外的最高剂量率为 $17.3\mu\text{Sv/h}$ ,此处的累积剂量达到了20mSv以上,这一剂量大约是核电厂从业人员平均每年允许的辐射剂量限值。距福岛电站200km外的东京5月1日已检测不到放射性碘-131和铯-137,剂量率水平约 $0.08\mu\text{Sv/h}$ ,这已十分接近东京本底剂量( $0.028\mu\text{Sv/h}$ — $0.079\mu\text{Sv/h}$ )。距离福岛电站海岸线30km以外的海水中的碘-131与铯-137的放射性活度分别不超过15Bq/l和60Bq/l,而国际食品法典委员会规定的食品中规定的碘-131与铯-137参考上限分别为100Bq/kg和1000Bq/kg<sup>[8]</sup>。随着放射性核素的扩散,福岛周边部分蔬菜、牛奶和饮用水也一度检测出放射性物质超标。

#### 3.3 辐射对公众健康的影响

当人体接受的照射剂量低于250mSv时,无临床症状;照射剂量接近或高于1000mSv时,才会出现急性放射性疾病,有恶心、呕吐及可能发生骨髓综合症表现<sup>[9]</sup>。剂量不



中国科学院

高时,机体可以通过自身的代谢过程对受损的细胞或局部组织进行修复。福岛事故发生后,放射性核素先后已在北半球多个国家的空气中检测到,但是检测出的量极低,世界卫生组织已明确表示对其他国家民众暂不构成健康风险<sup>[10]</sup>;排放到海洋里的放射性物质被稀释,其污染持续时间有限且局限在福岛附近的海域,对我国不会产生影响。目前东京地区的辐射量已降低到天然本底水平,福岛电站 30km 范围处也基本降低到  $1\mu\text{Sv/h}$  的水平,在此剂量下不会导致放射性疾病。3 名参与核电站抢险的工作人员因防护不当,受到较高辐射,其中两名因脚部浸泡和接触高活度放射性废水而发生局部皮肤放射损伤;后期参与抢险的队员,累积受照射剂量不超过  $250\text{mSv}$ ,不太可能产生辐射损伤的症状。目前尚无其他急性放射损伤及核辐射导致死亡事件的报道。

福岛核电站事故虽与切尔诺贝利核电站事故属同级别,但目前福岛电站泄漏的放射性活度要低一个数量级,同时日本政府采取了防护措施如及时组织电站周围人员疏散至安全地区等,也大大减少了核辐射对公众的危害。根据目前获取信息分析,福岛核事故对人类健康的危害将远低于切尔诺贝利核事故,但其潜在的远期危害还需要未来长期的跟踪调查研究。

### 3.4 对社会经济的影响

福岛核电站事故发生后,对日本社会产生了不容忽视的影响:福岛电站周边居民被迫疏散,且未来很长一段时间可能无法返回家园;随着部分核电站关停,电力供应出现缺口,日本对部分地区进行了限电;同时,对事故的处理和应对不力导致日本国家形象和企业信用受损;事故带来上述社会影响的同时也引起了股市下跌;受到放射性的影响,日本出口行业损失惨重;这一系列连锁

反应必将导致巨额经济损失,但具体数额目前尚无法估计。

福岛核电站事故同样引发世界范围内的社会恐慌,在中国和日、美、法等国分别发生抢购碘盐和碘片的现象。同时,此次事故在一定的时期将对世界核电的发展产生重要影响。世界各国纷纷对正在运营的核电站开展进一步的安全检查与防范措施,同时暂停实施部分核电站延寿计划,以及调整核电发展规划。

## 4 启示与思考

### 4.1 设计理念与核电技术

坚持“安全第一”的前提下,逐步使用更先进的核电技术。福岛第一核电站采用的沸水堆不具有“非能动”安全性,遇紧急情况停堆后,须启用备用电源驱动冷却水循环散热。但极端严重灾害(外部事件)及其叠加会导致堆芯失去强迫冷却手段,最终导致堆芯熔化和放射性泄漏。我国目前投运和在建的核电机组主要是采用安全性好的改进型第二代堆技术,第三代堆也已开始建设,第四代堆和更加先进的反应堆(如次临界堆、聚变堆)等技术研究也取得了可喜的进展。先进反应堆设计充分采用“非能动”安全系统,一旦遭遇紧急情况,不需要依靠交流电源和应急发电机,仅利用自然循环、重力等自然物理现象与原理就可驱动核电厂的安全系统,带走堆芯余热,从而保证核电站处于安全状态。逐步使用更先进的核电技术是必然的选择,但仍然必须坚持核电“安全第一”的宗旨,在新旧核电技术及机型的选择上应持有全面客观评价和谨慎选择的态度,勇敢果断淘汰落后技术的同时,要积极谨慎地推动技术创新。

### 4.2 核安全管理

完善核事故应急体系,全面加强核应急能力。日本政府和东京电力公司屡屡贻误以

最小代价解决此次核电事故的关键时机,显示了日本对于核灾难的应急方案准备严重不足,应急能力差。需进一步提高环境监测能力和重大核事故的处理能力,全面加强中央、地方政府与运营公司之间统一的协调、指挥及决策能力、各种应急资源的调动能力、事故处理专家的支持能力和核电厂自身现场抢险能力。

建立自检、互检、专检的“核安全三检制”和信息公开监督制度,建立信任档案并加大执法问责力度。建立完善的国家核安全法规体系是国家监管的基础,条件成熟时要尽快建立和实施国家核能基本法,作为制定行政法规、条例、规定、导则和标准的主要依据。在进一步加大国家核安全监管力度的同时,强化核电企业自检的意识,并引入企业间定期安全互检的机制,达到相互学习相互促进的目的,同时提高核安全信息的透明度,接受社会的广泛监督。在此基础上,建立信任档案并加大执法工作力度,对于安全事故瞒报、迟报、漏报,要严肃追究相关单位和人员责任并永久记录信任档案。

加强和重视多重极端灾害的安全评估和应对措施监督管理。自然灾害难以预期也难以阻止,但可以通过在核电站设计和建造之初重视和加强多重极端灾害的安全评估工作,在结合我国厂址实际条件的基础上改进和完善我国核电厂防范各种自然灾害的安全管理监督措施尽最大可能预防并减轻其危害。同时,还要针对沿海与内陆厂址特别是多堆厂的具体特点,制定相应的安全管理与维护措施。

#### 4.3 核能发展战略

福岛核电站事故发生后,世界各国纷纷重视评估自己的核电政策。中国国务院常务会议要求暂停审批新的核电项目,同时立即组织对我国核设施进行全面安全检查。目前

中国作为世界上最大发展中国家对于能源需求增长基本为刚性的,核电是目前可预见的唯一可大规模替代化石能源的清洁能源,与其他非化石能源相比,核电技术可大规模、高密度提供稳定的电力供应。而且全球核能经过了近几十年的发展,在先进反应堆设计理念、关键技术、安全文化、监督管理方面都有了质的提高,更先进更安全的堆型不断推出并开始建造。笔者认为我国坚持安全高效发展核电的大趋势不会因为本次事故而改变,也不应动摇。事故发生后,美、俄、法等核电大国也明确表示坚持发展核电政策的态度,说明各国在对待核能问题的认识上日趋理性。

与其他核电大国比,我国核电技术起步迟,但总体起点较高,近年来展现出了技术多样化趋势,这为长期发展建立了基础,但也提出了如何优化选择技术路线的新课题。笔者认为目前核电应用应以经过大量实践证明的安全保守技术为主,不宜将关系国计民生的核电市场作为试验场,而以发展和积累未来核能新技术为目的的基础研究则应多样化,并加大投入以掌握未来发展的战略先机,例如加紧研究和开发更加安全的先进核反应堆设计与建造技术、核燃料的高效利用技术和核废料的永久处置技术等。

#### 4.4 核安全文化与教育

福岛核电站事故给核安全文化发展敲响了警钟,一座核电厂能否安全、可靠、经济地运行,不仅取决于所采用的设计和技术,而且与建造的质量、建成后的运行管理、操作人员的专业素质和技术水平密切相关。任何事故的防范及后果不仅取决于事先制定应对策略,而且取决于对应急计划的执行态度和执行能力。因此,核电营运单位和管理机构应该高度重视全体员工的核安全文化建设,真正树立“安全第一”、“质量第一”的



中国科学院

意识,确保核电厂的安全稳定运行,在任何可预期的极端外部条件下也不危害环境和公众的健康。

近年来,中国核电建设速度很快,具有实际运行和管理经验的核电人才迅速稀释,一些承担重要岗位工作的人员培训时间和经验积累相对有所减少,对所在岗位的工作认识不够,致使把握和应对紧急或者复杂事情的能力有限。为了满足核电单位人才的快速紧急需求,许多大学设置了核能相关专业加速培养青年人才,但由于前期投入不够,师资力量和教学条件有限,如何保证人才培养质量也是一项很大的挑战。

除了加强核电相关单位职业人员的教育以保障核能的安全利用外,提高民众对核能和核安全的认识也是一项巨大而且非常重要的任务。民众由于对于核能不了解而充满了神秘感和恐惧感,由此带来的社会恐慌有时比直接危害要更严重,从这次波及全国的抢购碘盐风潮就可见民众对核能和辐射防护知识缺乏基本了解,这种现象不仅影响民众正常生活,而且影响经济有序发展,严重时还会引起社会稳定问题。

福岛核电站事故是一个很好的核安全教育及核安全知识普及契机,大量媒体的关注使得人们对核电的认识更深入了一层,但要使人们从一知半解、提高到理性地对待核电的利益与风险,还要做大量的工作。这不仅需要企业努力,同样需要社会的广泛参与,国家核能有关机构应要求企业和社会有关部门将公众核科普教育常态化、制度化。这种教育不仅能更好地保护民众健康,也能促进民众对核能发展的支持。当然核能要得到长期稳定的发展,最根本的还是要确保其安全有效地应用,最终让事实说服民众接受和欢迎它。

福岛核电站事故作为人类核能和平利

用过程中第三次重大核事故,引起各国重新评估核能发展规划,对于核能安全性、经济性和社会效应方面提出新的反思。此次事故进展具体情况,东京电力公司提供的信息有限,本文根据目前搜集到各类事故信息给出了分析和思考,希望本文能够抛砖引玉,引起大家讨论和思考。

#### 主要参考文献

- 1 Tokyo Electric Power Company. Overview of facility of Fukushima Daiichi Nuclear Power Station, <http://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/index-e.html>
- 2 Nuclear and Industrial Safety Agency. INES Rating on the Events in Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station by the Tohoku District - off the Pacific Ocean Earthquake, April 12, 2011.
- 3 Tokyo Electric Power Company. The Great East Japan Earthquake and Current Status of Nuclear Power Stations, April 25, 2011.
- 4 Daniel Clery. Current Designs Address Safety Problems in Fukushima Reactors. Science, 2011, 331 (6 024): 1 506.
- 5 Hanauer S H. Pressure Suppression Containments, Atomic Energy Commission, United States, 1972.
- 6 Lahey R T, Moody F J. The Thermal-hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor, 2nd ed. La Grange Park, Ill., USA: American Nuclear Society, 1993.
- 7 Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology (MEXT), <http://www.mext.go.jp/english/incident/1303962.htm>
- 8 Codex Alimentarius Commission. General Standard for Contaminants and Toxins in Food and Feed (CODEX STAN 193, 33-37).
- 9 刘树铮. 医学放射生物学.北京:原子能出版社, 2006, 7.
- 10 World Health Organization, FAQs - Japan Nuclear Concerns, Revised: 28 April 2011.

# Impact and Thinking of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident

Wu Yican

(Institute of Plasma Physics, CAS 230031 Hefei)

**Abstract** The cause of the Fukushima Nuclear Power Plant accident and its impacts on the nuclear power station itself, environment public health and society are emphatically analyzed in this paper. The impacts of the accident to China's nuclear power technology selection, nuclear safety management, nuclear energy development strategy and nuclear safety culture and education are considered and analyzed.

**Keywords** Fukushima Daiichi nuclear accident, cause and consequence, inspiration and thinking

吴宜灿 中国科学院等离子体物理研究所副所长、研究员、博士生导师, FDS(先进核能研究)团队负责人, 中国科学技术大学核科学技术学院副院长、教授。1985年毕业于西安交通大学核反应堆工程与安全专业, 先后在德国 FZK 研究中心、日本国立聚变研究所和比利时 SCK 研究中心作访问学者, 主要从事先进核反应堆设计、核安全、辐射医学物理及应用等领域研究。兼任国际原子能机构顾问专家、国际先进核能系统技术委员会委员、中国核物理学会反应堆物理与核材料专业委员会主任委员和国家核安全与环境专家委员会委员等学术职务。主持 IAEA 和 ITER 国际合作项目、国家“863”/“973”项目、中科院战略性先导科技专项等 30 余项, 发表论文 200 余篇, 已培养和正在指导研究生 70 余名。获省部级科技成果一等奖 4 项、“江淮十大杰出青年”等荣誉称号 10 余项。E-mail: ycwu@ipp.ac.cn



中国科学院