

日本福岛核事故的反思

李文红 刘强

【摘要】 日本东北和关东地区发生的里氏 9.0 级强烈地震及海啸, 导致福岛核电厂放射性物质严重泄漏, 国际核和放射性事件定级为 7 级核事故, 核事故发生后的患值得深刻反思。

【关键词】 日本福岛; 核事故; 反思

Reflection for the nuclear accident in Fukushima, Japan LI Wen-hong*, LIU Qiang. *National Institute for Radiological Protection, Chinese Center for Disease Control and Prevention, Beijing 100088, China
Corresponding author: LIU Qiang, Email: dr.qiangliu@yahoo.com.cn

【Abstract】 The 9.0 magnitude earthquake and tsunami happened at the great east Japan on 11 March 2011, which resulted in the serious leakage of radioactive material in the Fukushima nuclear power plant. The rating of the severity of the disaster was level 7 on the International Nuclear and Radiological Event Scale of 1-7. This article gives an overview of the future lessons and troubles after the accident.

【Key words】 Fukushima; Nuclear accident; Reflection

1 福岛核事故概述

2011 年 3 月 11 日 14 时 46 分, 日本东北和关东地区发生了里氏 9.0 级强烈地震及海啸。地震震中附近的 4 座核电厂(女川核电厂、福岛第一核电厂、福岛第二核电厂、东海核电厂)的 14 部机组受到地震和海啸的影响, 当时的核反应堆状态见表 1^[1]。其中, 女川核电厂、福岛第二核电厂及东海核电厂最后皆安全冷却停机。但福岛第一核电厂正在运行的 1-3 号机组反应堆因故即时自动停堆, 1 h 后地震引发高达 14~15 m 高的海啸, 导致应急柴油机催毁, 所有交流电源供应丧失。8 h 后电池组耗尽, 堆芯温度开始升高。次日(3 月 12 日)泄压后, 于 15 时 36 分, 1 号机组厂房发生氢气爆炸。考虑到多个反应堆同时事态恶化而存在的任何潜在风险, 日本政府决定将周围群众撤离范围扩大到距福岛第一核电厂半径 20 km 以外的区域^[2-3]。3 月 14 日, 3 号机组发生氢气爆炸; 3 月 15 日, 2 号机组发生氢气爆炸和冒烟事件, 4 号机组发生火灾。3 月底, 政府要求返家人员需穿着防护服并携带剂量计, 并要

求在家里最多停留 2 h, 然后接受辐射检查。

表 1 日本地震震中附近的 4 座核电厂及 14 部机组的状态

4 座核电厂的 14 部机组	自动关机	制冷关机
女川核电厂		
第一机组 524 MW*, 1984-**	✓	✓
第二机组 825 MW, 1995-	✓	✓
第三机组 825 MW, 2002-	✓	✓
福岛第一核电厂		
第一机组 460 MW, 1971-	✓	
第二机组 784 MW, 1974-	✓	
第三机组 784 MW, 1976-	✓	
第四机组 784 MW, 1978-	定期检查	
第五机组 784 MW, 1978-	定期检查	✓
第六机组 1100 MW, 1979-	定期检查	✓
福岛第二核电厂		
第一机组 1100 MW, 1982-	✓	✓
第二机组 1100 MW, 1984-	✓	✓
第三机组 1100 MW, 1985-	✓	✓
第四机组 1100 MW, 1987-	✓	✓
东海核电厂		
第一机组 1100 MW, 1978-	✓	✓

注: 表中, *: MW 为兆瓦; **: 开始运行年代。

2 福岛核事故环境辐射监测

2.1 分工

本来, 日本法规规定陆地环境监测的责任在于地方政府, 海洋监测由海岸保卫局负责。强烈地震

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2012.01.010

作者单位: 100088 北京, 中国疾病预防控制中心辐射防护与核安全医学所辐射防护与核应急中国疾病预防控制中心重点实验室(李文红); 300192 天津, 中国医学科学院放射医学研究所辐射危害评价研究室(刘强)

通信作者: 刘强(E-mail: dr.qiangliu@yahoo.com.cn)

及海啸发生后,由于地方政府忙于救灾,而且文部科学省具有放射性监测的能力,因此日本政府决定由文部科学省开展环境监测。福岛核事故场区内的监测,由日本东京电力公司(东电公司)负责,海水监测的任务分工为:福岛核电厂 30 km 范围内海水监测由东电公司负责,30 km 以外由日本海洋研究机构负责。

合作伙伴包括各县有关机构、日本警察厅、日本国防部、美国能源部、日本原子力研究开发机构、(财)原子力安全技术中心、日本海洋-地球科学技术机构、日本宇宙航空研究开发机构、有关大学和电力公司等,监测区域包括陆地、海洋和空中。

2.2 监测项目^[4]

监测项目包括剂量率监测(100 多个固定监测点、监测车,航空监测、海洋监测),累积剂量监测(固定点),核素定量分析(主要是 ¹³¹I 和 ¹³⁷Cs,包括灰尘、土壤、池水、草、饮用水、沉降水、海水、海底土壤)。陆地监测频率基本上为每日。福岛核电厂周边设置了 100 多个固定监测点,各监测点采取轮流取样测量的方式,每日约测量 40 个点,每周至少对固定监测点循环监测一次,环境辐射监测数据每周汇总通报一次。如果发现辐射剂量较高的点,将提高该监测点的取样频次。文部科学省还开展了公路沿线的环境辐射剂量调查工作,采用车载剂量监测装置进行测量。与美国能源部合作,日本开展了航空辐射监测工作,美国能源部动用了固定翼飞机和直升机,日方使用的是直升飞机。通过空中取得的数据,利用软件推算出距离地面 1 m 的辐射剂量率,同时,通过地面取样测量数据对推算结果进行校核。

2.3 监测到的放射性核素

据张立国等^[5]报道,福岛第一核电厂 4 个机组事故释放的放射性核素总量:¹³³Xe 为 3.5×10^{18} Bq, ¹³¹I 为 2.0×10^{17} Bq, ¹³⁷Cs 为 1.9×10^{16} Bq。部分核素的释放量见表 2。

日本原子力安全保安院最初估计福岛核事故中 ¹³¹I 释放量为 1.3×10^{17} Bq, ¹³⁷Cs 释放量为 6.1×10^{15} Bq,后更改为 ¹³¹I 释放量为 1.6×10^{17} Bq 和 ¹³⁷Cs 释放量为 1.5×10^{16} Bq,而日本原子力安全委员会评估所得 ¹³¹I 释放量为 1.5×10^{17} Bq, ¹³⁷Cs 释放量为 1.2×10^{16} Bq^[2]。福岛核事故主要核素释放估计结果与切

尔诺贝利核事故释放量的比较见表 3。

根据潘自强主编的《辐射安全手册》中对国际核和放射性事件的定级^[6],对福岛第一核电厂核泄漏事故定级为 7 级。

表 2 福岛核事故部分放射性核素的释放量 (Bq)

核素	释放量
⁸⁸ Kr	1.7×10^{15}
⁹⁰ Sr	1.2×10^{16}
¹⁰⁶ Ru	8.3×10^{16}
¹⁰³ Ru	8.1×10^{16}
¹³² Te	2.1×10^{17}
¹³¹ I	2.0×10^{17}
¹³² I	9.6×10^{13}
¹³³ I	1.1×10^{17}
¹³⁵ I	1.5×10^{16}
¹³³ Xe	3.5×10^{18}
¹³⁵ Xe	5.8×10^{16}
¹³⁴ Cs	1.8×10^{16}
¹³⁷ Cs	1.9×10^{16}
¹⁴⁴ Ce	2.5×10^{17}
²⁴¹ Pu	1.8×10^{16}

表 3 福岛核事故主要核素释放估计结果与切尔诺贝利核事故释放量的比较 (Bq)

核素	福岛核事故释放量		切尔诺贝利核事故释放量
	NISA	NSC	IAEA
¹³³ Xe	-	-	6.5×10^{18}
¹³¹ I	1.6×10^{17}	1.5×10^{17}	1.7×10^{18}
¹³⁷ Cs	1.5×10^{16}	1.2×10^{16}	8.5×10^{16}

注:表中,“-”表示无此项数据;NISA 为原子力安全保安院;NSC 为原子力安全委员会;IAEA 为国际原子能机构。

3 福岛核事故后日本政府颁布暂行的食品放射性限定值

福岛核事故后,依照食品卫生法,日本颁布暂行在食品中的放射性材料限定值,并通知当地政府。日本政府颁布的暂行食品放射性限定值见表 4^[2],大于 100 Bq/kg 的物质不能用于婴儿配方的牛奶或是直接饮用。考虑到放射性核素的污染,日本每日监测食物中的放射性水平,并且限制分配那些不符合临时限定值的食物。

4 福岛核事故的特征、原因及教训

4.1 福岛核事故的特征^[2]

由极端自然灾害引起、长时间全厂完全断电(没有动力电源、没有照明、没有仪表指示、没有

表 4 福岛核事故后日本政府暂行规定的食品中放射性
限定值 (Bq/kg)

检测的放射性核素	食品类别	放射性限定值
放射性碘 (^{131}I)	饮用水 *	300
	牛奶、奶制品 Δ	300
	蔬菜(除去根茎类 蔬菜和薯类)	2000
放射性铯 (^{134}Cs 和 ^{137}Cs 的总和)	饮用水	200
	牛奶、乳制品	200
	蔬菜	500
	谷物	500
铀	肉、蛋、鱼、其他食品	500
	婴儿食品	20
	饮用水	20
	牛奶、乳制品	20
	蔬菜	100
钍和超钍等 α 放 射性核素 (^{238}Pu 、 ^{239}Pu 、 ^{240}Pu 、 ^{242}Pu 、 ^{241}Am 、 ^{242}Cm 、 ^{243}Cm 和 ^{244}Cm 的总和)	谷物	100
	肉、蛋、鱼、其他食品	100
	婴儿食品	1
	饮用水	1
	牛奶、乳制品	1
	蔬菜	10
	谷物	10
	肉、蛋、鱼、其他食品	10

注：表中，*：自来水活度浓度超过 100 Bq/kg，则不可供婴儿直接饮用或用其冲调婴儿奶粉； Δ ：提供指南以便超过 100 Bq/kg 的原料奶不被用于生产婴儿配方奶粉或婴儿直接饮用奶。

控制手段)，同时丧失最终热阱、局部位置不可达、多机组相继发生堆熔、在未预计到的位置发生氢气爆炸、大量放射性物质释放。

4.2 福岛核事故产生的原因

福岛核事故作为核电运行半个多世纪以来的最严重事故之一，其产生原因是多方面的，其中有不可抗拒的自然因素^[7]，也有人为设计缺陷和纵深防御不足等。曹永进等^[8]分析：福岛核事故产生的原因有自然因素和人为设计因素 2 种：

自然因素：3 月 11 日，日本发生 9 级强震引发浪高 10 m 海啸，部分区域登陆浪高一度高达 20 多米，接近日本历史记录。福岛核电厂所在位置海啸约 14 m，属于超万年一遇极限事故叠加的超设计基准的外部事件，强震导致了外部电网损毁。按照设计要求，地震发生后福岛核电厂的应急柴油机应紧急启动，保持反应堆冷却系统继续工作，然而地震引起的海啸淹没了柴油机厂房，造成电源彻底丧失，全厂断电，冷却系统无法工作，反应堆产生的热

量无法导出，从而导致难以控制的事故产生。

人为设计因素：国际原子能机构在实地评估福岛核电厂泄漏事故后的一份报告中分析，日本低估了海啸对核电厂的潜在威胁，应对海啸风险的措施不足。福岛第一核电厂墙体高不足 6 m，远低于本次海啸高度，在对海啸的评估中，日本多次阐明本国核设施的“安全功能不会受到海啸的严重影响”，而在核电设计兴建时基本上只考虑到抗震因素，并没有对海啸防范采取更高措施。福岛核电厂均为沸水堆，结构设计易导致放射性泄漏，且核电装置未设计氢气复合装置，反应堆燃料组件受热发生熔化后，包裹核燃料的锆合金与水反应产生氢气，致使反应堆内氢气浓度持续上升，当达到一定浓度时与厂房内的氧气发生化学反应而引发爆炸，从而导致放射性物质大面积泄漏和扩散。

4.3 汲取福岛核事故的惨痛教训

历次核事故的教训是惨痛的，但同时，每次事故也不断推动核技术和核监管的进步，使核事业走上一个新台阶。日本福岛核事故同样引起了全球核能界的高度警示和深刻教训。潘英杰等^[9]指出：

(1) 核能工业必须坚持安全第一的原则。核设施的规划、设计、建造、运行、退役全过程和各个环节都要高标准、严要求，牢牢筑起安全的防线。

(2) 核能工业要充分注意防范极端自然灾害及次生灾害的影响，特别要注意几种灾害叠加引发事故的可能性和严重程度。

(3) 核能工业要具备严格的安全系统、监控系统和监测系统，并时刻都处在有效的可靠状态。

(4) 要有完善可操作的核事故应急预案，并配备必要的应急通讯、应急资源和应急组织，满足核事故应急响应需要。

(5) 加强对专业人员和环境公众的核科普知识和核安全知识宣传教育，提高工作人员和环境公众对核和放射性的认识，提高人们对辐射防范技术措施的控制能力。

(6) 为避免和尽可能减轻事故后果，应对超出设计范围的事件提前做出更加稳妥的应急对策，以期在严重事件发生时能更周密的控制和修复预案。

5 核事故后的深刻反思

5.1 自然灾害加先天不足

此次日本东北和关东地区发生的强烈地震和海

啸造成福岛第一核电站严重破坏。核事故发生的主要原因是核电站的防海啸设计不足,造成厂区严重淹水,安全冷却/补水系统丧失(最终热沉)与电力系统失效(电厂全黑),核燃料持续产生的热量无法有效移除,后续救灾应变不及,造成事故扩大。

5.2 安全管理是关键

保证核能发电的安全性是主管单位要坚持的基本原则,只有确保安全,才能放心使用核能。日本福岛第一核电站发生的事故对核能界来说是一个重大的经验教训,管理部门应密切关注地震、海啸的发生,恰如其分的评估,及时调整管理措施,以确保持核电站的安全,只有这样才能使民众心安。

6 结语

回顾 26 年前的切尔诺贝利核事故,至今余悸犹存,痛苦仍在!福岛核泄漏的后患是难以估计的,事故发生十几年、几十年后,一些预想不到的事件也会渐渐显现出来,对核与辐射的远后期效应及其对环境影响的研究,将是今后很重要的研究领域。

参 考 文 献

- [1] Akashi M. Japan's challenges: concerning the domestic and international implications of TEPCO Fukushima Dai-ichi nuclear power station[DB/OL]. (2011-05-17) [2011-10-28]. http://www.nirs.go.jp/data/pdf/WHO_PresenVer3.pdf.
- [2] Yonekura Y. Exposures from the events at the NPPs in Fukushima following the east Japan earthquake and tsunami[DB/OL]. (2011-05-23)[2011-10-28]. http://www.nirs.go.jp/data/pdf/Presentation_Yonekura_2011-05-23.pdf.
- [3] Wakeford R. And now, Fukushima. J Radiol Prot, 2011, 31 (2): 167-176.
- [4] 张建岗,汤荣耀,赵兵,等.福岛核事故的影响及经验.二十一世纪初辐射防护论坛第九次会议论文集,扬州,2011.扬州:“二十一世纪初辐射防护论坛”第九次会议组委会,2011: 76-80.
- [5] 张立国,曹建主,薛大知,等.福岛核事故后果初步评价与思考.二十一世纪初辐射防护论坛第九次会议论文集,扬州,2011.扬州:“二十一世纪初辐射防护论坛”第九次会议组委会,2011: 81-88.
- [6] 潘白强.辐射安全手册.北京:科学出版社,2011: 386.
- [7] 柴国早.汲取福岛事故经验教训 提高核电安全水平.二十一世纪初辐射防护论坛第九次会议论文集,扬州,2011.扬州:“二十一世纪初辐射防护论坛”第九次会议组委会,2011: 7-11.
- [8] 曹永进,杜恒雁,田伟.关于日本福岛核电站事故应急的初步探讨.二十一世纪初辐射防护论坛第九次会议论文集,扬州,2011.扬州:“二十一世纪初辐射防护论坛”第九次会议组委会,2011: 312-315.
- [9] 潘英杰,王英稳,薛建新,等.汲取福岛核电事故教训,促进核能工业安全发展.二十一世纪初辐射防护论坛第九次会议论文集,扬州,2011.扬州:“二十一世纪初辐射防护论坛”第九次会议组委会,2011: 317-32.

(收稿日期: 2011-10-30)

儿童 CT 检查的放射防护

李磊 涂彧

【摘要】近几十年来,CT 成为诊断疾病的重要影像学手段之一。但是,考虑到患儿的高辐射敏感性,行 CT 时应当慎重。可以通过对剂量指数、剂量长度乘积、扫描层厚和面积这些 CT 相关参数的控制来降低患儿受照剂量。在保证 CT 图像清楚的前提下,对管电流、管电压、螺距的控制,同样可降低患儿受照剂量。通过有效剂量和集体剂量评估患儿的受照剂量。应当在辐射防护三原则的基础上开展患儿 CT 检查工作。

【关键词】 体层摄影术; X 线计算机; 儿童; 辐射防护

The radiological protection of the children CT LI Lei, TU Yu. Department of Radiology, School of Radiation Medicine and Protection, Soochow University, Suzhou 215123, China

Corresponding author: TU Yu, Email: tuyu@suda.edu.cn

DOI: 10.3760/cma.j.issn.1673-4114.2012.01.011

作者单位: 215123 苏州,苏州大学医学部放射医学与防护系

放射医学专业

通信作者: 涂彧 (Email: tuyu@suda.edu.cn)