

## 日本“福岛核事故”灾后救援 现场亲历与思考\*

文 / 彭子龙<sup>1</sup> 邱华盛<sup>1</sup> 王志光<sup>2</sup> 秦芝<sup>2</sup> 杨磊<sup>2</sup> 戴博伟<sup>1</sup> 詹文龙<sup>1</sup>

1 中国科学院 北京 100864

2 中国科学院近代物理研究所 兰州 730000

**【摘要】** 中科院代表团应邀于2015年3月25日实地考察了日本“福岛核事故”的灾后救援现场。文章详细介绍了代表团在现场的所见所闻,重点介绍了反应堆厂房应急处理、反应堆冷却水处理、地下水隔离等核事故应急措施及其工程实施进展,同时结合我国核电发展情况,建议我国在全面总结和吸取福岛核事故的经验教训,学习日本的核事故应急处理处置技术和程序,积极加强与日本在核与辐射安全领域的科技合作。

**【关键词】** 福岛,核事故,现场亲历

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.04.015

### 1 背景

日本当地时间2011年3月11日14时46分,日本东部发生了自1900年以来日本第一、全球第四的强烈地震——里氏9.0级的“东日本大地震”<sup>①</sup>。地震引发的巨大海啸,袭击了日本东部沿海。超过14米高的海啸

浪潮冲击并淹没了由东京电力公司(简称“东电公司”)运营的福岛第一核电站内部,摧毁了备用柴油发电机和燃油储存罐,致使因地震已自动停堆的1-3号反应堆以及1-4号乏燃料池<sup>②</sup>失去冷却能力<sup>③</sup>、反应堆芯温度在衰变热作用下持续升高引发高温锆水

- ① 2011年4月1日,日本内阁会议决定将此次地震称为“东日本大地震”(Great East Japan Earthquake)
- ② 乏燃料池位于安全壳外、核岛厂房内,用于临时储存从反应堆卸出的乏燃料。在反应堆维修、换料、事故期间,正在使用的核燃料组件也会从反应堆移到乏燃料池。乏燃料仍然有衰变余热,需要进行长期冷却,以防止其裸露,避免其因融化而释放放射性物质
- ③ 根据《国际原子能机构国际事实调查专家组针对日本东部大地震和海啸引发的福岛第一核电站核事故调查报告》([http://wenku.baidu.com/link?url=4mXX8cCPFuHG9IXoIv-TbAOc-xtSSoapLBbqveIRG6CziDJOV4Uy-HXI8jt15Z\\_1B5rdmgAbVP-2\\_eAgWV1ba0lVKP-3-Gw\\_3Fb5VBdkUG](http://wenku.baidu.com/link?url=4mXX8cCPFuHG9IXoIv-TbAOc-xtSSoapLBbqveIRG6CziDJOV4Uy-HXI8jt15Z_1B5rdmgAbVP-2_eAgWV1ba0lVKP-3-Gw_3Fb5VBdkUG)),海啸造成除一台应急柴油发电机(6B)之外的所有电源丧失,厂内和厂外都丧失了可用的重要供电,且外部援助无望。海啸以及全厂断电导致1-4号机组的所有仪控系统全部失灵,只有应急柴油发电机6B能向5-6号机组提供应急电源。另外,4号机组当时正值换料大修期间,没有运行

\* 修改稿收到日期:2015年7月8日



中国科学院

反应并最终导致氢气爆炸,严重破坏了厂房结构并导致大量放射性物质外泄,造成了震惊世界的“3·11 福岛核事故”。

“福岛核事故”是人类和平利用核能发展史上,继美国“三哩岛核事故”、前苏联“切尔诺贝利核事故”之后又一次重大核事故,它不仅引发了各国核电发展政策的调整<sup>④</sup>,也引起了普通民众的持续性担忧。为实地考察核事故后果的严重性,亲身体验核事故的灾后救援和当地民众的生活,并在我国今后相关科研活动中切实加强核安全技术研究,中科院代表团应日本相关机构的邀请,组团于2015年3月25日深入日本福岛第一核电站实地考察核事故灾后救援现场。

## 2 核事故灾后救援现场

中科院代表团首先到达距福岛第一核电站20 km的核事故处理中心(原日本国家足球队训练场,位于广野町的J-Village),由东电公司原常务董事小森明生等相关负责人接待。小森在核事故发生之初即在一线负责协调指挥,他向代表团详细介绍了灾后处理的相关情况:

(1)在经过各种原因导致的初期混乱后,经紧急注水冷却,1-3号反应堆进入了冷停堆的稳定状态,周边放射性物质浓度也很快降至初期浓度的十万分之一至百万分之一的水平。

(2)建立了由东电公司负责的灾后处理体系,根据环境测量数据确定了半径约20 km的隔离区,建立了隔离区内作业规程,提出了各项紧急处理措施和为期40年的核电站退役处理方案,并组建了近7 000人的专业队伍具体实施;整体救援工作在2023年前的重点是移除1-3号反应堆内融化

再凝固后的堆芯。

(3)临时性封闭处理了受损的1-4号厂房;实施了处理受污染水的3项措施以及隔离区内的地表去污处理。

在听取情况介绍后,代表团驱车前往事故现场,沿途依次通过了被称为“解除准备区”(即准备解除限制允许民众返家居住的区域)和“归还困难区”(即短期内难以让民众返家居住的区域,目前允许当地居民每年返回15次)。沿途辐射剂量率均在 $5 \mu\text{Sv/h}$ <sup>④</sup>以下,但距厂区大门约2 km处小山口附近的局部区域达 $15 \mu\text{Sv/h}$ 。两区域内村镇仍无人居住,耕地上可散见地表土收集袋整齐堆放,个别区域仍有作业人员在进地表去污处理。据介绍,当地3年以来种植的水稻的放射性指标经检测为正常。

代表团团员经过两次身份检查进入1号核电站厂区后,由厂区出入管理处发放了简易防护用品和个人辐射剂量仪后再换车前往距核电厂房200 m处的“紧急对策研究本部”(2010年刚建成启用的抗震大楼,约200人在此每天三班全天工作)。在这里换上全身隔离防护服后,先后实地考察了高性能多核素脱除水处理设施、地下水抽水深井、地下人工冻土隔离墙、4号厂房乏燃料移出工地以及受污染地表土集中堆放场等设施 and 作业现场(图1),简要情况如下:

(1)即将投入运行、日处理能力为 $500 \text{ m}^3$ 的高性能多核素脱除水处理设施,可吸附去除水中铯-90和铯-137等62种放射性核素,但浓度约 $10^6 \text{ Bq/L}$ 的氚<sup>⑤</sup>不能去除,仍需储水罐储存。这是目前的最大困难,尽管已准备了 $100 \text{ 万 m}^3$ 的储水罐( $80 \text{ 万 m}^3$ 已使用),但每天还需不断排出约 $300 \text{ m}^3$ 的反

<sup>④</sup> 西弗是辐射剂量单位,由符号Sv表示。西弗是一个非常大的单位,因此通常使用毫西弗( $1 \text{ mSv}=0.001 \text{ Sv}$ )和微西弗( $1 \mu\text{Sv}=0.001 \text{ mSv}$ );辐射剂量率则为单位时间内的辐射剂量。根据我国《电离辐射防护剂辐射源安全基本标准》(GB 18871-2002)的规定,对于普通民众,年有效剂量为 $1 \text{ mSv}$ ,特殊情况下如果连续5年的平均剂量小于 $1 \text{ mSv}$ ,则某一年的有效剂量可提高到 $5 \text{ mSv}$ ;对于职业人员,连续5年的年平均有效剂量为 $20 \text{ mSv}$ ,同时任何一年中的有效剂量为 $50 \text{ mSv}$ 。一般而言,普通民众在日常生活中受到的天然辐射剂量为 $2-4 \text{ mSv/年}$ ;坐10小时飞机相当于接受约 $0.03 \text{ mSv}$ 剂量,一次胸部X光拍片约为 $0.023 \text{ mSv}$ 。一次小于 $100 \text{ mSv}$ 的辐射在临床上观测不到任何变化,通常视为对人体无影响;一次 $1\ 000-2\ 000 \text{ mSv}$ 可能会引发轻度急性放射病,能够治愈;一次性遭受 $4\ 000 \text{ mSv}$ 则可能会致死



图1 代表团在福岛第一核电站4号厂房西侧考察1-4号厂房应急处理和地下人工冻土墙的施工情况

m)以防止反应堆区的受污染地下水流入大海。反观上述工程庞大、成本高昂的地下水防护措施,我国新建反应堆应提前考虑地下水的隔离。

(4)在4号厂房使用了3万多吨钢材搭建了独立承重的外部钢架和起重设备,在2014年12月22日成功移出了1535根暂存乏燃料和核燃料组件。此处(厂房外西侧约10 m)辐射剂量率为54  $\mu\text{Sv/h}$ ,是考察全程中的最高强度。

由于乏燃料池的安全防护措施远弱于反应堆,因此此次核事故中的环境放射性泄露,

在当时的最大风险来自于各厂房乏燃料池中暂存的大量乏燃料和核燃料组件,尤其是4号厂房中因反应堆换料大修而暂存仅3个多月的204根核燃料组件,据估算其衰变热高达0.6—1.0 MW<sup>[2]</sup>。若因乏燃料池冷却系统中断而导致乏燃料裸露甚至熔化,其后果的严重性可能更甚于反应堆安全壳破损。因此对于乏燃料,一方面需更加重视反应堆厂房内暂存的科学规划,同时需要加快乏燃料安全处理处置的科学技术研究。

(5)受污染地表物集中堆放于1号、2号核电站之间的原火车站区域。此处已大量堆放了袋装的地表去污物(10—20 cm厚的表层土、灌木杂草、残枝落叶等),在线监测显示此处辐射剂量率约0.3  $\mu\text{Sv/h}$ 。

代表团每人佩带的辐射计量仪显示,此次考察整个过程中人体受到的辐射剂量在

应堆冷却水。因此,厂区内高密度地阵列安放着众多1000 m<sup>3</sup>容积的大型储水罐。

(2)横向12口30 m深井排布在地下水的上游方向,通过不断抽水(每天约250 m<sup>3</sup>)以尽可能降低反应堆区的地下水水位。在此布井处(+30 m高程),可清晰看到受损最严重的1号厂房加盖了隔离顶棚(2011年10月完成)以及准备移出乏燃料池中暂存乏燃料的机械装置;2号厂房外观较完整,据介绍北侧的泄露破口也已封闭;3号厂房反应堆顶部瓦砾残渣业已清理(2013年10月完成)及准备移出暂存乏燃料的大型机械设施。

(3)计划2015年4月投入使用的地下人工冻土隔离墙,环绕反应堆区(周长1500 m)进行设置,通过对地下管道加注冷冻液使局部土壤在-30℃下形成深达地下30 m的人工冻土墙以防止地下水渗入反应堆区;同时沿海岸线设置防渗钢板墙(总长800

⑤ 氚(<sup>3</sup>H)是氢元素的一种同位素,半衰期为12.32年,纯 $\beta$ 放射性。如何解决上述浓度氚的吸附是科学家亟待解决的关键科学技术问题。根据我国《核电厂放射性液态流出物排放技术要求》(GB14587-2011),对于滨河、滨湖或滨水库厂址,其系统排放口处除<sup>3</sup>H、<sup>14</sup>C外其他放射性核素的总排放浓度上限为100 Bq/L;且总排放口下游1 km处受纳水体中总 $\beta$ 放射性浓度不得超过1 Bq/L,<sup>3</sup>H浓度不得超过100 Bq/L



中国科学院

10—20  $\mu\text{Sv}$  之间,略小于一次胸部 X 光拍片的剂量。

### 3 思考与建议

对于“福岛核事故”,国际核能界在技术角度已有大量深刻的分析和总结,我国随后也开展了全面深入的核电安全大检查,并进一步修改完善了核安全监管体系和防护等级。中科院代表团此行实地考察与亲身感受,也引起了一些非技术角度的思考。

(1)“福岛核事故”应急处理处置方面的警示。核电站安全的技术可靠性应该说经受了检验,福岛核电站在强地震来袭时均按设计实现了紧急停堆,海啸来袭之前的应急电力供应系统也工作正常。酿成福岛核事故的重要因素,除设计缺陷、选址地势过低、灾害设防不够等技术层面因素外,我们认为还有其核应急决策的体系和权限方面的问题。鉴于放射性物质外泄事故的广域性和灾难性,应急决策权应归于国家,而非运营核电站的企业。事故初期若果断放弃保全反应堆的利益考虑,及时进行海水灌注,核事故应该是有可能避免的。另外,应急救援体系中指挥混乱、反应迟钝、信息不畅等问题,也是造成事故初期持续恶化的重要因素之一。

(2)日本在核事故后的处理处置在技术及其实施上值得学习和借鉴。在尽可能防止受污染地下水外流的问题上,日本在抽水深井、地下人工冻土隔离墙、海岸钢板墙等措施具有因地制宜的创造性。在确保作业人员人身安全方面,在规程执行、防护用品质量等各个细节上切实做到了一丝

不苟,令人心生敬意。代表团考察全程也先后更换了3次车辆、接受了5次辐射剂量检查。建议通过中日双边或国际原子能机构(IAEA)渠道,组织我国核电企业领导层以及国家主管核安全、核应急等的有关部门赴福岛核电站实地考察,将有利于切实落实我国的核安全相关法规。同时也建议争取派驻观察员进入其灾后处理体系,系统地观摩学习其全体系、全流程的应急处置规范,以备不时之参考。

(3)中日双方在核与辐射安全领域具有广阔合作空间。日本是和平利用核能领域的科技强国,积累了丰富的经验和海量的数据,而我国则正在迅速发展成为核能利用的大国,除核能利用技术方面的商业合作,双方科学家应在核与辐射安全领域开展多渠道更广泛的科研合作,不仅为两国、也为全人类和平利用核能的持续发展做出贡献。

核电是一种清洁高效的能源,积极稳妥地发展核电是我国能源战略的重要组成部分。尽管核电在技术上具有安全保障并随着技术进步其安全性还在不断提高,但我国仍应充分吸取“福岛核事故”应急救援的经验教训,加强核电安全监管力度和应急处置能力,切实保障核电安全,同时切实加强核能与核安全知识的公众普及,让核电更好地服务国家经济发展,造福人类社会。

#### 参考文献

- 1 曲学基. 日本福岛核电站泄漏事件 引发世界各国调整核电政策. 电源技术应用, 2011, (10): 1-5.
- 2 陈海英, 刘圆圆, 张春明, 等. 福岛乏燃料水池事故探讨. 核安全, 2012, (2): 76-78.

## Experience the Rescue Scene after Fukushima Nuclear Accident and Reflections

Peng Zilong<sup>1</sup> Qiu Huasheng<sup>1</sup> Wang Zhiguang<sup>2</sup> Qin Zhi<sup>2</sup> Yang Lei<sup>2</sup> Dai Bowei<sup>1</sup> Zhan Wenlong<sup>1</sup>

(1 Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China;

2 Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract** The delegation from Chinese Academy of Sciences was invited to visit the rescue scene of Fukushima Nuclear Accident on March 25, 2015. This paper introduces what the delegation saw and heard in the rescue scene, especially the emergency measures of the damaged reactor plant after the accident, the decontamination of reactor cooling water, and the isolation of groundwater, as well as the implementation progress of those treatments. Combined with the nuclear power development in China, it is suggested that, together with the lessons learned from the Fukushima Nuclear Accident, the technology and procedure of the nuclear accident emergency management in Japan should be investigated in greater depth, and the research cooperation in field of nuclear and radiation safety with Japan should be strengthened in greater width as well.

**Keywords** Fukushima, nuclear accident, experience the rescue scene

**彭子龙** 中科院重大科技任务局材料能源处处长。2001年获华中科技大学工学博士学位,2003年从物理所磁学国家重点实验室博士后出站,2004年调入中科院原基础科学局工作。全程参与了中科院“未来先进核裂变能“战略性先导科技专项(A类)的酝酿、研讨、立项论证和组织实施。E-mail: zlpeng@cashq.ac.cn

**Peng Zilong**, the Director of Division of Material Science and Energy Science, CAS Bureau of Major R&D Programs, obtained his doctorate degree in engineering in 2001, post-doctoral outbound from the State Key Laboratory of Magnetism in the Institute of Physics of CAS in 2003, then worked in the former Bureau of Basic Research in CAS in 2004, and transferred to the Bureau of Major R&D Programs in 2013. He participated in the entire process of brewing, discussion, authorization, organization and implementation of “Advanced Nuclear Fission Energy” Strategic Priority Research Program of CAS. E-mail: zlpeng@cashq.ac.cn



中国科学院