

浅谈日本福岛核电事故及其放射性影响

中国科大核科学技术学院 陈志

2011年3月11日下午，日本东部海域发生里氏9.0级大地震，并引发了海啸。位于日本本州岛东部沿海的福岛第一核电站停堆，几个机组发生了失去冷却剂事故。3月12日下午，一号机组发生了爆炸。3月14日，三号机组发生了两次爆炸。这几次爆炸的发生，改写了世界核安全历史，福岛核电事故将成为继美国三里岛和前苏联切尔诺贝利核电事故之后的第三大核电事故被载入史册。然而，本次核电事故与三里岛和切尔诺贝利核电事故还是有着很大的不同，下面针对本次核电事故及其放射性影响做点粗浅的分析。

1、福岛第一核电站简介

日本福岛第一核电站位于日本福岛县双叶郡大熊町沿海。该电站共有6台机组（如图1所示），1号机组439MW，1970年并网发电，1971年投入商业运行。3号机组784MW，20世纪70年代中期投产。所有6台机组全为沸水堆。



图1 日本福岛第一核电站鸟瞰图

2、沸水堆主要特点

沸水堆属于轻水堆家族，采用轻水做慢化剂和冷却剂，低富集度的二氧化铀做燃料，外包锆合金包壳。沸水堆基本运行原理图如图2所示，来自汽轮机系统的给水进入反应堆压力容器后，沿着堆芯周围的圆筒与压力容器内壁之间的环形空间下降，在泵的作用下进入堆下腔室，然后向上流过堆芯，受热并部分汽化。汽水混合物经汽水分离器分离后，蒸汽通往汽轮发电机发电。沸水堆同压水堆类

似，也有几道安全屏障：燃料包壳（锆合金）、压力容器以及安全壳。

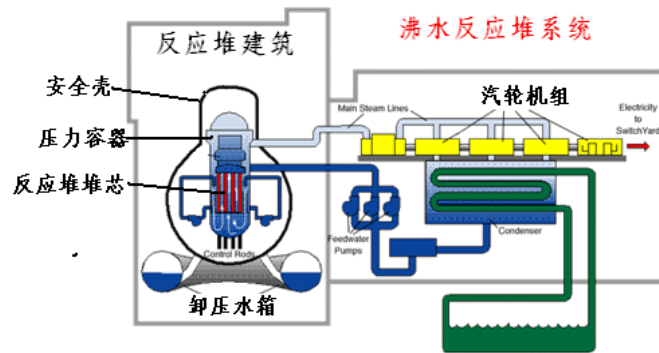


图 2 沸水堆基本运行原理图

这种堆型的主要特点为：

(1)、控制棒从堆芯下方插入。由于沸水堆堆芯上部有汽水分离器，而且上部是蒸汽为主，所以反应堆控制棒从堆芯下方插入。控制棒在反应堆正常运行时由电驱动或机械驱动，断电时靠备用液压把控制棒顶上去，不能像压水堆那样断电后可以靠重力落棒。

(2)、沸水堆采用直接循环。沸水堆产生的蒸汽直接被引入汽轮机发电，因而沸水堆中没有蒸汽发生器和稳压器，节约了投资。同时由于蒸汽压力能够比压水堆高，所以热效率也更高。

(3)、沸水堆的反应性不用硼做化学补偿。沸水堆流过堆芯的清水，而不像压水堆一回路中是硼酸溶液。

(4)、沸水堆卸压方式不同于压水堆。沸水堆的卸压水箱不在反应堆压力容器内，泄压时，蒸汽直接通过反应堆压力容器和安全壳这两道屏障。

3、福岛第一核电事故原因分析

据资料介绍，福岛核电站在 2011 年 3 月 11 日下午地震发生后，操作员就将控制棒插进了堆芯，并实现了反应堆停堆，从而反应堆堆芯的热功率在几分钟内由正常的 1400MW 下降到只剩下余热，但仍有 4%左右的热功率。随后余热功率虽然仍在下降，但是下降的速度变慢。

停堆以后，应立即启动安注系统并由安注系统向堆芯补水，保证堆芯冷却防止超压，但是地震摧毁了电网，场外电源不可用。按照核电厂事故应急程序规定，如果发生严重事故并伴随着全厂断电，核电厂应急柴油机应该在 20 秒内迅速启动，为核电厂安全相关系统提供电力。应急柴油机启动后，为了核电站今后还能

继续使用，操作员保守地向堆芯内注入了清水，而不是含硼水。随着海啸的到来，柴油机机房被淹，应急柴油机失效，堆芯失去了供水。这时，操作员启动了蓄电池应急，然而由于蓄电池容量太小，不能支撑长时间的供电。工作人员运来了移动式柴油发电机，但是此柴油机的接口和核电站的接口不兼容，因此，堆芯冷却暂时停止。

到了3月12日，为了保护住核电厂的第二道安全屏障——压力容器，必须卸压。防止压力容器爆炸，于是操作员打开了蒸汽阀门开始卸压，但是此时已经检测到了放射性碘和铯，说明堆芯燃料元件包壳已经有破损了。此时压力容器内的温度约为550℃，堆芯已经开始裸露，燃料包壳锆合金和蒸汽发生锆水反应并产生了大量的氢气。含氢的蒸汽通过卸压箱简单地降温 and 过滤后就被排放到了厂房大气中（也就是图2中的反应堆建筑）。3月12日下午三点左右，由于厂房中氢气越聚越多，和氧气混合的比例达到了爆炸极限，随着一声巨响，反应堆厂房顶盖被爆炸完全摧毁，只剩下钢结构。

4、日本福岛核电站事故与前两次世界核电事故的差异

日本福岛核电事故虽然对世界核能行业的发展带来了相当深远的不良影响，但是它与前两次世界核电事故还是有着本质区别的，主要如下：

美国三里岛压水堆核电厂二号堆于1979年3月28日发生的堆芯失水而熔化和放射性物质外逸的重大事故。这次事故是由于二回路的水泵发生故障后，二回路的事后冷却系统自动投入，但因事故前几天工人检修后未将事故冷却系统的阀门打开，致使这一系统自动投入后，二回路的水仍断流。当堆内温度和压力在此情况下升高后，反应堆就自动停堆，卸压阀也自动打开，放出堆芯内的部分汽水混合物。同时，当反应堆内压力下降至正常时，卸压阀由于故障未能自动回座，使堆芯冷却剂继续外流，压力降至正常值以下，于是应急堆芯冷却系统自动投入，但操作人员未判明卸压阀没有回座，反而关闭了应急堆芯冷却系统，停止了向堆芯内注水。这一系列的管理和操作上的失误与设备上的故障交织在一起，使一次小的故障急剧扩大，造成堆芯熔化的严重事故。

在1986年4月26日，前苏联切尔诺贝利核电站反应堆的热功率降至200MW时，8号汽轮发电机停机，这时机组人员还在进行试验。不久，反应堆的功率就开始上升。由于流过反应堆的水流量减少，所以生成的蒸汽多，汽水分离器的蒸

汽压力升高。由于反应堆的安全系统和保护系统被切断，当堆芯中蒸汽增加、水减少，即水吸收的中子减少，所以引起了正反应性，即功率增加，产生的蒸汽增加又引起功率增加，从而发生了超临界事故。

由于发生超临界事故，产生大量蒸汽，所以燃料通道管内的压力迅速增加，燃料棒的温度升高，使燃料通道管破裂，蒸汽就漏到反应堆内的空间，即石墨中间。水蒸汽和石墨作用产生一氧化碳，高温蒸汽与锆合金发生化学反应产生氢气。氢气、一氧化碳和空气(氧气)混合就形成爆炸性气体，所以在 1986 年 4 月 26 日 1:24 时接连发生两次爆炸，使反应堆和部分建筑物遭到破坏，并引起了一场火灾，大量放射性裂变产物释放到环境中。

前两次世界核电事故从某种意义上讲人为因素很多，三里岛事故由于一系列人为原因造成了堆芯熔化的严重事故。切尔诺贝利核电事故由于人为因素发生了超临界事故，锆水反应产生的氢气和石墨水反应产生的一氧化碳再与氧气混合从而发生了爆炸，安全壳被破坏。而本次福岛核电事故已经完成了正常紧急停堆，但是余热排出系统正常工作受到破坏，而使燃料包壳破损，其严重程度要小得多。虽然同切尔诺贝利事故类似，也是氢气爆炸，但是福岛核电站氢气爆炸发生的地点在反应堆厂房里面，并不是在安全壳内，其严重程度相比之下要小。以上爆炸属于氢气爆炸，而不是社会上流传的所谓核爆炸。

5、福岛核电事故放射性影响

由于福岛核电站堆芯受损，因此可能放出一系列放射性物质，一些物质相对无害，而另一些物质却极具危险性。这些放射性物质最危险的特征是可以透过皮肤、呼吸道、口腔等途径进入人体。在核电事故中，对人们最易带来危险的是放射性化学物质以四分之一沙粒大小的颗粒形态被释放出来，这些物质包括碘-131、铯-137 以及锶-90 等。这些物质对人体极具威胁，因为这些放射性物质能模仿人类身体自然组织所需的元素成分，从而进入到人体组织器官中去。但是在核电事故中，即便堆芯完全熔化，一些最具放射性的物质将会下降到压力容器的底部，而不会散发到大气中，这些物质将由专业的核辐射清理人员做特殊处理。

放射性碘-131 在一定条件下可以迅速分散于空气和水当中。然而，碘-131 半衰期只有 8 天，这意味着在几个月内它就会完全衰变。放射性碘-131 可以通过空气吸入到人体体内，它可能沉积在草地上，通过奶牛吃过受污染的草制成的奶

制品传染给人体，它也可能沉积在蔬菜的叶子上或集聚在海产品和淡水鱼身上，通过饮食消费转移到人体器官当中。

锶-90 的半衰期为 29.1 年，由于它的化学特性类似于钙，往往集聚在人体的骨骼和牙齿上。在切尔诺贝利核电站事故中，就有大量的锶-90 释放到空气中，沉积在前苏联、北欧以及其它地区。锶-90 主要通过食物和饮用水进入人体，其摄入量的多少往往与骨骼病、骨软组织肿瘤和白血病相关。

铯-137 的半衰期为 30 年，是核反应堆堆芯释放出来的另一种高危物质，往往通过食物和水被人体摄入，或通过呼吸道进入人体器官。人体暴露在铯-137 之中会大大增加患癌症的风险。

尽管有这么多的危险存在，但是日本福岛核电站事故不会发生切尔诺贝利式的大灾难。因为切尔诺贝利核电站反应堆是利用碳物质来减缓裂变反应中的中子，在那次灾难中，火灾点燃了这些碳，并产生了放射性的煤烟，随着风飘往各地。而像日本的福岛核电站反应堆，堆芯是由钢制的安全容器密封好的，且现在的反应堆采用水来降低中子的活性，而不是以前常使用的碳物质，故不存在大量的放射性烟尘从福岛核电站散发出来的危险。因此，日本福岛核电站事故放射性影响是局部的，是有限的。

参考文献：

1、2011 年 3 月 14 日【美国】华尔街日报；

2、国际核安全中心：

http://www.insc.anl.gov/cgi-bin/rperl/sql_interface?view=newrx_data&qvar=oracle_id&qval=198；

3、东京电力公司官网：http://www.tepco.co.jp/nu/f1-np/press_f1/2010/2010-j.html

4、IAEA：<http://www.iaea.org/newscenter/news/tsunamiupdate01.html>；

5、世界核能新闻：

http://www.world-nuclear-news.org/RS_Battle_to_stabilise_earthquake_reactors_12031111.html；

6、核安全专业务实（《注册核安全工程师岗位培训丛书》）中国环境科学出版社，2004 年 11 月第一版。