

CNIC-01947

MCTU-0001

核电设施的安全性研究

赵 炯 吴金宗

(同济大学机械工程学院, 上海, 201804)

摘 要

近年来,我国经济快速增长与国家整体电力相对不足之间的矛盾越来越突出。另一方面,国家也面临着温室效应和油价不断上涨等各种各样的难题。在这种情况下,大力推动我国核电事业的发展已迫在眉睫。可以预测,未来的核电站数量将大大的增加,然而核电站的安全性问题一直以来都是人们关注和讨论的焦点。结合在日本核电站实习的经验,从几个方面研究了核电站的安全问题,认为建立对核电设施安全性的风险评价和管理体系是安全发展核电事业行之有效的措施。

关键词: 核电站 多方面 安全性研究

Research on the Security of Nuclear Power Equipment

(*In Chinese*)

ZHAO Jiong Wu jinzong

(Mechanical College of Tongji University, Shanghai, 201804)

ABSTRACT

Recently, the rapidly growing economy in conflict with the lack of power in the whole country become more and more seriously in our country. In other hand, there is also various kind of problems such as greenhouse effect and the oil price rising conditions. It greatly promote our country's development of Nuclear power project. As forecast, the number of Nuclear Power Plant will increase greatly in the future. However, the security of the Nuclear Power Plant is one of the topics that people always pay more attention to. Combining with the practice experience of Nuclear Power Plant in Japanese, the security of Nuclear Power Plant in multi-angles is discussed. It is pointed that the risk assessment and management system of nuclear power plant are effective measure for security of the development of nuclear power.

Key words: Nuclear power plant, Multi-angles, Security research

引言

在核电站中,确保核电站堆芯的安全需要有“多重防护”设备。核电站应该把防止事故的发生作为第一目标,即在“人员操作错误”或“机器出现故障”的情况下,或者两者同时出现时,也能够确保安全。甚至进一步假设即使故障发生了,也能够使故障不再继续扩大,并把故障影响控制在最小范围内^[1]。为了达到这个目标,应该做到以下几点:

(1) 防止异常事故的发生

对于核电站来说,安全是第一重要的事情。为了防止由于突发事故而使机器产生异常,在设计核电站堆芯时要留有足够而富余的安全系数,设备不但要有严格的质量控制体系、还要细心检查和反复检验。当系统的某一部分万一发生故障或者是操作错误时,要有相应的安全装置。譬如,在出现以上紧急情况时,电源能够自动切断,使燃料棒在自身重力和水压作用下进入堆芯,核反应堆紧急关闭,整个堆芯反应停止,从而起到安全保护的作用。

(2) 抑制机器发生异常事故

首先,机器设备早期异常情况的发现是非常重要的。譬如,为了快速地发现从水蒸气配管到冷却水等各种异常状态发生,应该配备各种相应的自动监视装置,万一发现异常情况时,就紧急停止核反应堆,或者紧急插入全部的燃料棒。这样核反应堆就自动停堆,从而抑制机器发生异常事故。

(3) 即使发生事故也要尽量减少事故对机器的影响

我们假设事故发生时,出现配管断裂、冷却材料丧失等各种情况。采取的相应对策就是设置紧急堆芯冷却装置(ECCS)和收藏容器喷雾器等多重装置。事故发生时,紧急堆芯冷却装置可向核反应堆内部快速注入大量的水,从而使核反应堆变为“冷却”结构。另一方面,核反应堆被密闭在核反应堆收藏容器中,放射性物质也不会泄露出来。

此外,对于核电研究机构,应该考虑到核电站和核燃料周期设施可能会产生各种各样的事故,并对可能产生的事故进行模拟实验和解析评价。国家应该提供必要的审查方针和审查标准。更进一步,在事故发生情况下,国家应该设置调查和分析产生事故原因的独立机构,这样可以在帮助核电企业的同时,也发挥对核电企业的监督作用。

1 确保核电安全性能的实验研究^[2~4]

以图 1 为例,在核电站堆芯安全性研究炉(NSRR)的模拟试验中,首先我们对 NSRR 来进行“反应度事故”模拟,进而对燃料进行安全性评价。“反应度事故”是指在燃料棒飞出而使核反应堆输出产生错乱的事故。根据调查了解燃料受到损坏的程度,以及这样的损害程度给核反应堆的安全性带来哪些影响。

其次,如图 2 所示,我们进一步对 PWR 系统大型非固定测试装置(LSTF)进行“冷却系丧失事故”的模拟测试。所谓的 LSTF 就是对 PWR 在最大输出功率时进行自然循环试验、水击试验、核电站炉心顶部破损试验等安全性试验,以及对实验进行安全性评价。根据模拟测试结果可以看出,即使在冷却系水蒸气配管损坏导致冷却材料流失的情况下,也可以通过控制员操作堆芯冷却装置(ECCS)(如图 3 所示)而使堆芯得到充分冷却,从而防止“冷却系丧失事故”的发生。

最后,进行防止事故发生的模拟测试,并且万一在事故发生时也能有相应的对策。

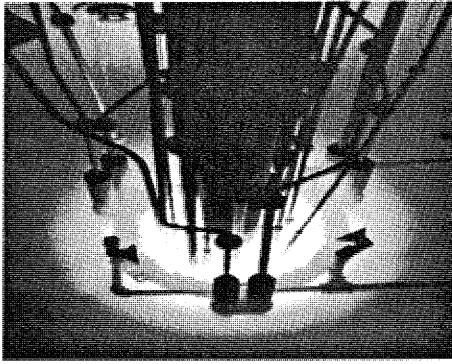


图 1 NSRR

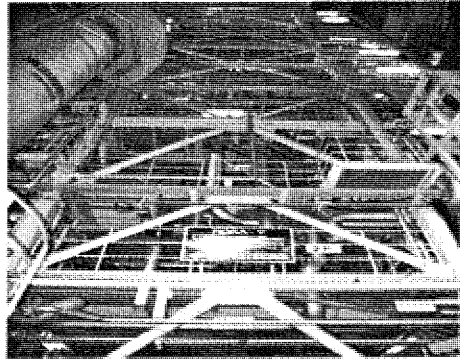


图 2 LSTF

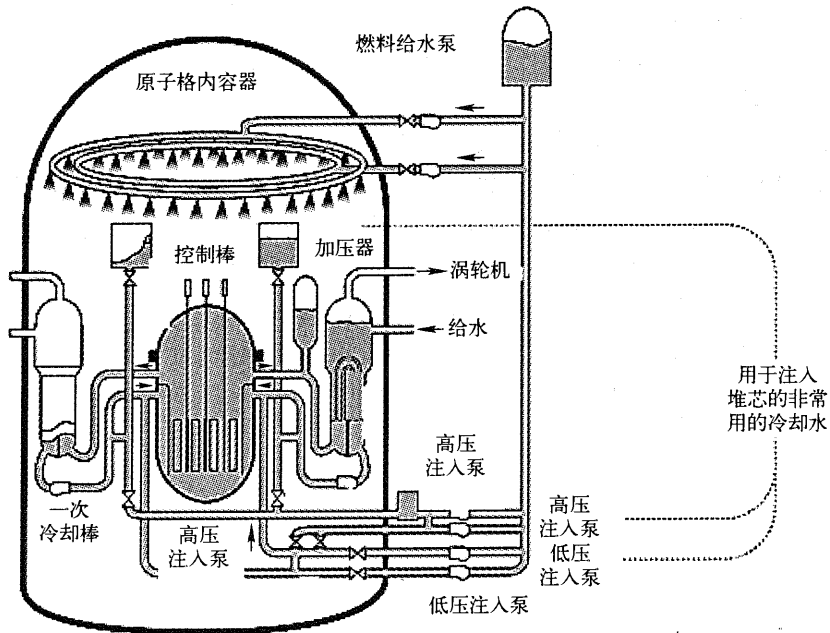


图 3 ECCS

2 核燃料周期的安全性

在核燃料周期中,为了确保再处理设施、MOX 燃料加工设施、运输和储藏设施的安全性,应该建立对临界安全管理、火灾、爆炸事故实施安全性技术评价体系。如图 4 所示,这可以通过固定临界实验装置(STACY)和过度临界实验装置(TRACY)来分别进行实验研究和验证^[3,5]。

STACY 是由 5%二氧化铀棒状燃料和中子可溶性 6%浓硝酸双氧铀有毒溶液构成的

非均值堆芯体系来进行临界试验运转的。自 1995 年第一次运转至今总次数有 533 次。但是,在 2006 年临界试验的条件进行了改进,由配置 15mm 的 5% 浓缩二氧化铀棒状燃料以及添加含钷金属元素的 6% 浓硝酸双氧铀有毒溶液构成非均值堆芯体系来进行临界试验的运转,仅 2006 年度运转的次数就有 45 次,运转的时间为 136 时 43 分,累计输出热量为 242.9 kW·h。试验证明,运转良好且安全。

TRACY 是用 10% 浓硝酸双氧铀溶液,在堆芯水反射围绕体系形成的临界条件下,进行核热特性试验和测定核放射量试验。自 1995 年第一次运转以来到现在的总次数为 328 次。2006 年度运转的次数为 31 次,运转的时间为 79 时 49 分,累计输出热量为 63.4 kW·h。试验证明,运转良好且安全。

在核燃料调制的过程中,STACY 使用 6% 的二氧化铀棒状燃料进行调制的同时,也调制了可溶性中子溶液的浓度,并对 STACY 的供给实施试验计划。在 2006 年进行的添加含钷金属元素铀溶液临界试验运转过程中,调查了钷金属元素的溶解度,据试验结果,设定了钷金属元素的溶解度的 1/5 来添加溶液,也就是 Gd 的浓度为 0.84 g/L,从而配置了含钷金属元素的 6% 浓硝酸双氧铀溶液。

总之,根据 STACY 和 TRACY 临界试验前后浓硝酸双氧铀溶液的浓度、容器形式和大小、周围的条件等发生的变化可以测得临界量。

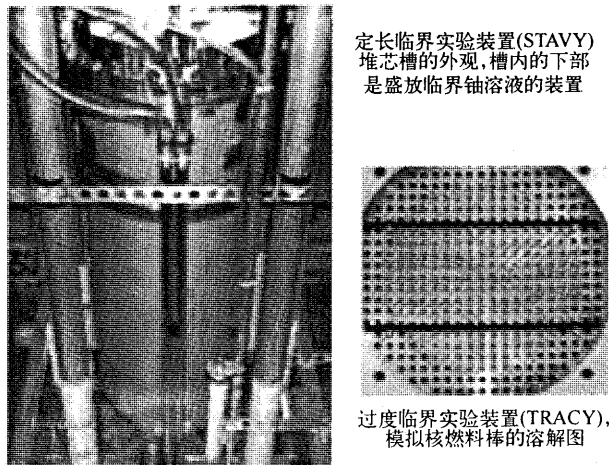


图 4 STACY 和 TRACY 实验配置图

3 废弃物的处理措施

我们应该考虑被埋藏在地层中的高放射性废弃物(玻璃固化体,处理装置如图 5 所示)的安全性和长期性问题,同时,为各种各样的低放射性废弃物的处置制定安全限制和安全基准,并对低水平废弃物的浓度上限值进行估算,以便考虑是否需要埋藏在地层中。此外,除了对以上两种放射性废弃物制定处理措施以外,还要注意操作人员和周边公共环境辐射量,并开发在废弃物处理之后能够对环境进行检测的设备等。

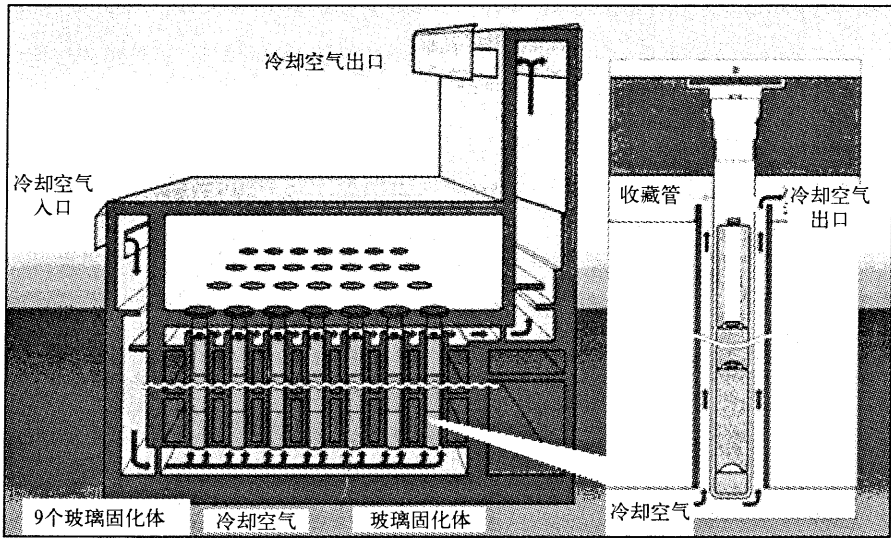


图5 核电站废弃物的处理设施

4 设置事故和故障分析库

我们应该对国内和国际核电站的大事故展开调查,例如三里岛II号机事故(1979年),切尔诺贝利事件(1986年),美滨2号机蒸气发生器传热管绝断事故(1991年),JCO事故(1999年),滨冈核电站1号机的配管绝断事故(2001年),福岛第二核电站3号机的裂纹问题(2002年)(如图6所示)等等^[5,6]。应尽可能查明原因,实施材料调查和健全性评价体系,应用再现实验,建立事故和故障分析库,使其对本国的核电站起到借鉴作用。

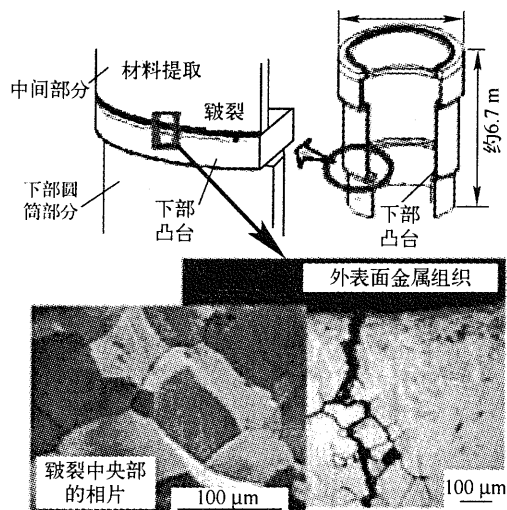


图6 福岛第二核电站3号机的裂纹问题

5 风险的评价和管理

为了执行安全制度和安全管理,开发了评价核电设施风险概率论安全评价(PSA)的方法。以下是风险信息核燃料周期设施的 PSA 方法,总共包含三个方面的评价体系^[7]:(1)防止堆芯损伤机能的评价:包括事故案例、安全设备的可靠性、人员操作的失误、炉心损伤事故发生频率等四项指标;(2)屏蔽堆芯容器机能的评价:包括事故发生的时候产生的物理现象、放射性物质的转移、屏蔽堆芯容器破损频度、放射性物质放出量等四项指标;(3)公众风险的评价:包括防护对策、放射性物质的转移、辐射量、健康和经济影响等四项指标。

建立这样的风险评价和管理体系,主要应该把握以下四个方面:(1)着重把握重要事故和防护对策;(2)有效合理的事件处理机制和防灾计划讨论机制;(3)有效合理的安全设施规则以及操作管理;(4)有公众参与风险的安全目标讨论机制。

6 结 论

总之,应该对核电站可能出现的各种事故进行试验研究,建立起对核电设施安全性的综合评价体系,不断地革新核电站技术,提高机器的安全性和可靠性,提高相关人员对核电站的运转能力和安全管理能力,以及对放射性物质的处理能力和对环境的保护。这对核电事业安全发展将是不可回避的重要课题。

参 考 文 献

- 1 日本核电安全·保安院. 核电安全规则的“风险情报”活用基本想法. 2005年12月.
- 2 SAIC. Nuclear Fuel Cycle Facility Accident Analysis Handbook. NUREG/CR-6410, March, 1998.
- 3 Knief R A. Nuclear Criticality Safety, Theory and practice. American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois USA 1985.
- 4 JAERI. 临界安全手册(第二版) 1999.
- 5 渡边宪夫. 关于海外核燃料设施临界事故的事例集. JAEA Research-Review, 2000-006, 2000.
- 6 Nakagawa T, et al, Japanese Evaluated Nuclear Data Library version 3 revision-2 JEN3. 2[J]. J. Nucl. Sci, 32:1259.
- 7 吉田他编. 关于核燃料设施的概率论安全评价(1). JAEA Research, 2006-085.
- 8 Tuck G. Simplified Methods for Estimating the Results of Accidental SolutioExcursions[J]. Nucl. Technol. , 1974, 23:177.