

关于核电安全的争议

Debating Perspectives on Nuclear Power Safety

傅凯思

(美国宾夕法尼亚州匹兹堡市卡内基梅隆大学工程与公共政策系)

赵 莎

(美国宾夕法尼亚州匹兹堡市匹兹堡大学公共与国际事务系)

引言

公众大多对核电站心存恐惧,是害怕1986年4月28日发生在前苏联切尔诺贝利核电站那样的灾难性核事故重演。不过,核电的推动者指出,今天的核电站具有许多安全系统,类似切尔诺贝利核事故几乎不可能再次发生,因为在现代核电站反应堆外面,都包有一层切尔诺贝利核电站所没有的钢筋水泥外壳,以防止放射性物质进入环境。确实,1979年美国三哩岛核电站的反应堆芯熔化事故发生时,几乎所有的核辐射都被阻截在了这严严实实的安全壳里。对于现代核电站来说,安全壳还只是其奉行的“纵深防御”战略中的一环。除此之外,当今的核电站还设计有多个相互独立、主动或者被动的安全防范措施,例如:用一层金属包裹铀燃料元件;将反应堆冷却系统与汽轮机隔离;装备有紧急冷却系统,以备堆芯失去冷却液;将反应堆通常设置在远离人口稠密的地区;备有紧急情况下疏散周围人群的应急计划。只有在所有安全措施同时失灵的情况下,危害公众健康的事故才会发生。

尽管核电推动者坚持现代核电站发生灾难性事故的可能性微乎其微,很多人仍持怀疑态度。当年切尔诺贝利的建造者,不也相信他们的核电站很安全吗?另外,核电工程师们又是如何计算事故可能性的呢?

1972年,美国原子能委员会(后来改组为核电管理委员会)组织了一项反应堆安全工程研究,来确立多种核反应堆发生灾难事故的概率。1975年结论正式分布:反应堆堆芯熔化的可能性为每2.5万反应堆年1次(“反应堆年”是指所有反应堆运行的总年数。如果一个国家有两座反应堆,各运行了10年,那么这个国家的“反应堆年”就是20年。目前世界上共有438座反应堆,据统计,总运行在1万反应堆年左右);而发生大量核物质外泄事故的可能性,仅为10亿反应堆年一次。

美国这项反应堆安全研究开创了核电风险概率分析的先河,但同时也招致了许多批评。原因是

它忽略了很多可能招致重大事故的因素。在听取意见、重新考虑更多安全隐患后,美国核能管理委员会又多次立项研究。综合考虑各种研究结果后,美国核能管理委员会再次公布了新的估计:堆芯熔化的概率为每1000反应堆年1次。这个结果比初始的估计扩大了几近250倍。

要理解美国核电工程师们是如何严重低估了重大核事故发生的概率,首先有必要审视以下他们所用的研究方法。

一、核电风险概率分析法

美国对核电站事故发生的概率进行评估,采用的是概率风险分析方法。它通过计算所有可以想象得到的技术和操作错误及其产生的后果,来估计重大核事故发生的可能性。

图一简要地显示了这种概率风险分析方法,是如何被用来评估冷却水管道泄漏从而导致事故发生的概率。在分析时,核电工程师首先将他们可以想象到的泄露后果都排列在一个被称作“错误树”的树状分析图形中,然后逐步提出问题。第一个问题是,冷却系统是否工作正常。如果答案是肯定的,没有事故发生,那么在错误树分析图中,分支向下,分析结束;如果冷却水管道泄漏发生,造成事故隐患,那么分支向上,分析继续。接下来的一个环节,是在这种情况下紧急冷却系统是否能够正常启动。如果紧急冷却系统启动,堆芯不会熔化,这个分支将向下并且结束;但是如果紧急冷却系统失灵,导致堆芯熔化,那么分支向上,分析继续。再接下来的一个环节,是在这种情况下,反应堆的安全外壳是否能够成功地阻止核辐射外泄。如果答案是肯定的,分支向下,终止结果为小型事故发生;如果答案是否定的,分支向上,终止结果为严重核辐射外泄事故发生。

接下来,核电工程师将确定导致事故发生的每一个环节出现故障的概率。工程师的确定方式,一半是根据其它相似工程系统的运行经验,另一半则取决于专家自身的判断。最后,每个环节的故障概

率相乘,从而得出事故的概率。例如在图 1 中,如果冷却系统管道泄漏,紧急冷却系统失灵,安全外壳失灵等 3 个故障发生的可能性各是 1 000 反应堆年 1 次。那么发生核辐射外泄重大事故的可能性,就是 10 亿反应堆年 1 次。

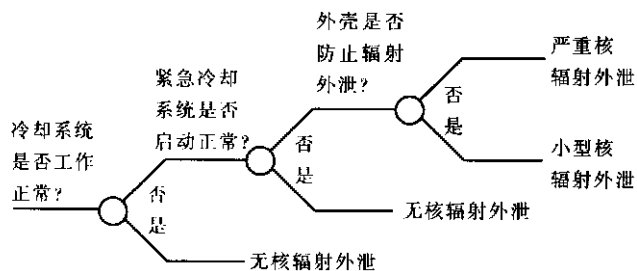


图 1 简化的错误树显示轻水反应堆冷却水系统泄漏导致某种后果的可能性

这种树状分析方法被用来检查核电专家们可以想象得到的所有可能导致核辐射外泄到环境里的事件。除了冷却水管道的泄漏,其它的因素还可能有电力中断,操作人员的操作错误,核电站区域发生地震、洪水等。

尽管核电专家们费尽心血来研究核电站的风险概率,他们的研究结果仍然遭到许多批评。主要一个问题是,对于复杂科技来说,根本就没有可能预测所有可以致使技术失败的因素。一座核电站由无数的子系统组成,操作人员也有各种出错的可能性,这里必然有很多意想不到的事故隐患没被纳入风险概率分析中。底特律附近的飞密(Fermi)反应堆,在 1966 年发生了部分堆芯熔化事故。事故的起因是一个金属盘因设计安装不对,多年后脱落而堵住了冷却水的流动。这个因素就根本没有被专家考虑在概率风险分析法里。

核电风险概率分析方法的另一个弱点是,使用这种分析方法的必要假设条件是各种故障是相互独立的。这也就是说在前面提到的树状分析图中,每个环节的分支向下或者向上延伸,之间并不交叉。但是事实证明,有时一个故障可能引发多个部分功能瘫痪,从而导致各个途径之间的交叉。发生在阿拉巴马州的布朗菲瑞(Browns Ferry)反应堆的事故就是一个例子。像其他的核电站一样,布朗菲瑞核电站的反应堆和控制中心之间连接着许多的备用电缆线。如果一个电缆中断,备用电缆就可以替代工作。采用标准的风险概率分析方法,各种电缆和其备用电缆同时中断的可能性非常小。可是 1975 年的某天,一个技术人员在控制室下面电缆纵横的地方,使用蜡烛检查空气泄露,不慎失火,出入控制室的许多电缆被烧毁,致使包括紧急冷却系统在内的很多安全系统同时失灵。这个典型的事故表明,核电风险概率分析在评估不可预测的各种系统同时失灵的方面有缺陷。

在进行概率风险评估时,核电工程师们通常都假设核电站达到了设计要求和管理规范。但是,核

电发展史上有大量事实表明,核电站的施工建造和操作运转并不总符合标准和规章。最典型的一个例子要算加利福尼亚海岸的达波峡谷(Diablo Canyon)核电站。在核电站的施工阶段,该地区被探测确定为有地震倾向,于是加装了很多地震防护设备。然而,就在该核电站即将投入使用前夕,技术人员发现电站的那些地震防护设备安装有误。一查之下,是由于施工人员在建筑施工时看错了设计图造成的。接下来的调查发现,该核电站还有超过 110 多处的其它施工错误。于是人们不禁要问,在其它正在运行的、没有经过如此细致检查的核电站中,又有多少尚不为人知的建筑施工问题呢?

同时,概率风险分析是假设核电站的操作均是符合规章的,但经验表明,规章并不总是被遵守。图 2 显示的是从 1987 年到 1997 年的 10 年间,被核电管理委员会发现的发生在美国所有核电站的违章操作统计数据。数据表明,美国核电站的违规操作行为总数,每年都在 1 000 次以上。

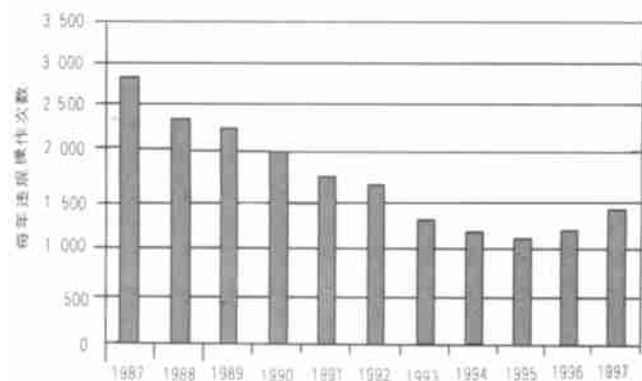


图 2 1987~1997 每年检查人员报告给核电管理委员会的违规操作次数

风险概率分析方法还有许多其它不切实际的假设。例如,核电站的大部分零部件需要运行 60 年以上,但关于零部件的可靠性是如何随着使用时间而降低的数据,并没有被确切掌握。概率风险分析则假设这些零部件在整个核电站的工作寿命中将保持同样的可靠性能。另外,紧急冷却系统是设计来防止因输送冷却水管道泄漏而产生堆芯熔化的,并不是设计来处理反应堆压力壳(装有核燃料的钢制容器)上出现裂纹的。而因反应堆压力壳破裂导致事故发生的情况,在美国的概率风险分析中,通常被假设为完全不可能发生。

最后,核电风险概率分析也忽略了人为的破坏。无论是心怀不轨的工作人员还是国内国外恐怖组织,都有可能核电站内或者是在核燃料储藏池实施蓄意破坏。而这些行为都极有可能导致严重事故发生。

由于以上诸多问题的存在,从 70 年代风险概率分析方法首次被用来估计该反应堆的安全性以来,

30年过去了,科学界对核电站事故概率预测数据的可信性仍持保留态度。

二、核电风险的特殊性

核电工程师们试图用数量分析方法来计算核事故概率,相比之下,普通老百姓对待核电风险的态度似乎更加感性、更加复杂。在这里,我们将对核电工程师和普通公众对待不同风险的不同态度作一简单比较。

在发电方面,核电站和火力发电站是竞争对手。火电站虽然不会发生灾难性事故,但通常会发生许多常规性的事故。在美国,为了给火电站提供煤燃料,每年平均有50个左右的采煤工人死于煤矿工伤事故。另外,有200人左右死于将煤炭向火电站运输的事故中。据公共健康专家估计,每年平均还有几千人死于全美500多个大型火力发电站导致的空气污染。因此,火电站技术是一种高常规性风险、低灾难性风险的技术。

与其相反,核电站则是一种低常规性风险、高灾难性风险的技术。全美有103个核电站,其常规职业意外死亡率非常低,每年大概只有12人左右,而且多半不是死于与核辐射有关的事故。但是,核电站的威胁是潜在的大型灾难性事故,可能一次就导致几千人死亡。

那么,政策制定者应该如何权衡这两种不同的风险呢?核电推动者认为,比较和选择应该基于平均每年的事故死亡人数。他们认为,如果一个核电站一次大的核辐射灾难导致1000人死亡,这样的灾难概率是100万反应堆年1次,那么,平均每年死亡人数是1000除以100万,等于0.001人/年,大大低于火电站的平均年死亡率。按照这种选择准则,核电站就比火电站安全。

但是,社会心理学家们指出,公众对风险的态度和这种平均算法不一致。研究表明,即使平均风险水平一致,公众往往愿意付出更高的代价来防止灾难性事故而不是常规性事故的发生。

读者可以想象,若是面对着一场赌博,其规则是,如果猜对了可以赢500元;如果猜错了则倒输500元,人们将会如何做。在这场赌博中,猜对猜错的机会均等,都是50%。显然,如果可以的话,很多人恐怕宁可付20元钱或者更多,而回避这场赌博。从心理学的角度看,这是因为失去500元的痛苦远比赢得500元的喜悦强烈得多。在这个类比中,输500元可以看作是一次灾难;赢500元可以当作没有灾难时的安全收益;付20元来避免这场赌博,则可以看作是为避免灾难而选择的常规性事故。在能源领域,我们也面对着一个相似的选择。人们也许宁愿保守地选择具有许多常规风险的火电站,而不愿意选择低常规风险,但有高灾难风险的核电站。

过去20年中,社会科学家还发现,在评估是否接受一项有风险的技术时,人们除了考虑多少人可能死亡以外,也考虑很多其它因素。在美国的一项

研究中,阿瑞根大学的研究人员调查了人们对核电站和其它类型的发电站的看法。结果表明,和其它类型的发电站相比,普通老百姓心目中的核电风险具有以下几个特性:不自愿,灾难性,恐怖,致命性,未知,滞后和不可控制。后续研究还表明,这些风险的主观特性更影响人们对风险技术的选择。

同时,其它研究还显示,公众往往对选择风险技术时的社会背景非常关注。美国橡树岭国家实验室的两名分析人员指出,人们决定是否接受一项风险通常考虑以下3个方面的社会因素:(1)那些可能受到危害的人是否参与了决策过程;(2)各种责任和义务是否在事故发生前就已经划分清楚了;(3)管理和监督机构是否有可信度。

美国公众对核电的接受程度有限,部分原因是由于核电站在选址建造之初,核电工业界没有提供充分的机会让居民参与决策。另外,公众的信任也因为核电工业方面总试图隐瞒核电站事故情况而大打折扣。例如在三哩岛核事故中,核电站操作人员甚至延迟好几个小时才向有关管理部门汇报核事故的发生。

十分巧合的是,在三哩岛核事故发生的一个星期前,美国好莱坞正好上映了一部名为《中国症状》的电影。该片讲述一次核电站事故导致堆芯熔化,核辐射一路直穿过地心抵达中国。这个电影引发了人们对于核事故的极大恐怖。核电的推动者尖锐地批评这部电影无知地夸大了核危险。他们指出,如果老百姓对核电的工作原理和安全防范设施有一些基本了解,就不会如此害怕核电。然而,研究风险的社会心理学家指出,因为核电风险特殊的灾难性特征和人们对社会因素的关注,使核电的公众接受趋于复杂化,仅仅简单地对公众进行核电技术普及教育,也许并不足以让他们接受核电。

三、管理监督的独立性与诚信

政府应该对可能带来灾难性事故的技术采取特殊的监督管理,以保障安全。公众对一项技术的接受与否,很大程度上也取决于政府的监督管理是否全面严格,以及公众对政府机构的信任程度。美国的核电管理机构经历过一段不甚理想的发展史。1975年以前,美国的核电管理监督机构是美国原子能委员会。它同时兼负着促进核电发展和安全监督管理的两个职责。这两个职责之间的内在冲突,导致了此机构最终分裂为两个相互独立的机构。1975年1月,美国核电管理委员会(核管会)正式成立,专门负责审核颁发核电站执照、建立各类安全运行规章制度,以及监督核电站的运转情况。

核管会成立后仅4年,其威信就被1979年发生的三哩岛核电站事故动摇。在事故刚发生后的那段时间内,核管会的反应显示出它缺乏对事故现场情况的了解。而且,由于没有就如何向地方、州政府和新闻媒体通报信息做好准备,核管会和核工业界提

供的关于事故危害程度的信息含糊其辞、难以理解,甚至相互矛盾。另外,三哩岛核事故主要是由于操作失误造成的。这更证明了核事故风险概率分析中关于操作符合规章的假设不成立。

在三哩岛事故发生后,核管会设立了大量的新的安全规章管理条例,扩大了安全监督范围,如更加注重管理人为的操作失误、小设备的故障,等等。另外,核管会还重新检查和设计了它的事故紧急应付措施,以便在预防事故发生的同时,也作好应急准备,把事故发生后的损失减到最小。

政治学家在对政府监督机构运转的研究中发现,一个成熟的管理监督机构,其立法往往倾向于对被管理行业有利。这是因为在和被监督行业打交道的过程中,监督机构会变得越来越官僚、自满,越来越受行业的影响。美国核管会由此遭致许多认为其管理不严、监督不够的批评。由于核电站具有潜在的发生灾难性事故的可能,核电监督管理部门尤其应该防范这种倾向。美国政治学家也提出了若干建议,诸如采用经济鼓励方式以促进监督人员尽职尽责、任命与核电工业没有当前和既往联系的人作监督人员等。这些建议,也许有助于保持管理部门的独立性,增强公众对核电管理部门的信任度。

四、固有安全性

当前世界上运行的核电反应堆,大多是 40 多年前的压水反应堆。当初选择压水反应堆并不是出于其安全性能,而是出于其发展速度的考虑。压水反应堆能够快速地从军用转为民用,因而在 50 年代中期在美国被推广用作商业发电。在三哩岛事故发生后,压水反应堆的安全设施有一定改进。据研究估计,当今美国军舰上核反应堆堆芯熔化的概率是 1 万反应堆年 1 次。尽管这个概率对于单独一个反应

堆来说很小,但对全世界 400 多个反应堆而言,风险还是太高因而难以给公众支持核电发展的信心。

不过,核电的推动者指出,随着技术的飞速发展,第二代设计的核反应堆比当前运行中的反应堆在安全性能上有很大的提高。这些被称作具有“固有安全性”的第二代核反应堆的设计,能够解决机器故障和操作人员失误导致事故的问题。因为如果任何故障发生,它不需要像第一代设计那样依靠备用设备启动或者操作人员正确反应来关闭核反应堆,而是会自动停堆。在具体技术上,有几种不同的设计方式能实现这一目标。例如,在一种设计中,紧急停堆系统不再依靠泵等设备,而是依靠重力来完成。另外一种设计被称作“球形燃料反应堆”,铀燃料被装在表面镀了一层坚硬的碳化硅的球形容器中,这使核燃料能够耐高温达 2 300 摄氏度也不会熔化,堆芯熔化的事故也就大大减少。

尽管工程师们提出了很多设计来确保核反应堆的安全,实际上至今仍然没有任何一种第二代反应堆设计完全投入施工并经过全面测试。面对目前尚在设计图纸上的新型核反应堆设计,投资商往往更关注它们可能非常高的成本投入。另外,很多专家提醒,即使是第二代反应堆设计,也并不是万无一失。例如前面提到的球形燃料反应堆,因为含有大量石墨,故而有失火的可能。已经有批评指出,“固有安全性”这一提法具有误导性。专家认为,新设计的核反应堆的确要比第一代核反应堆安全,但任何时候,对任何涉及大量放射性物质的运用,都不能忽视其中的安全运行问题,必须保持高度警觉,并严格监督。

(省略 16 篇英文参考文献)

(责任编辑 蔡德诚)

(上接第 55 页)

外场试验进行严格的科学设计和实施。

人工增雨试验方案中还应包括对作业效果进行预测。由于云降水数值模拟技术的不断进步,已在一定程度上能够描述中尺度云降水宏微观过程和催化过程,并预测人工播撒后的中尺度和局地热力、动力和各种微物理过程的响应。数值模拟不仅可作为人工增雨理论研究和效果预测、检验的最重要的手段之一,还可在外场试验设计中,对涉及效果物理检验的物理量提出监测、检验精度和时空变化等方面的理论方案,进而形成观测—理论—试验的人工增雨效果检验科学体系,建立有较高时空分辨率的物理、统计和数值模式相结合的效果综合检验技术和催化效果的预测方法。

四、结语

“八五”和“九五”期间,中国在北方层状云降水

研究、催化剂和催化工具研制、云降水监测技术和数值模拟以及省级通信指挥系统现代化建设等方面已取得了一批初步成果,国家级人工增雨西北试验基地一期工程也已启动,一些地方正在进行省级人工增雨作业试验示范基地的建设。这对突破人工增雨中某些基本科学问题,提供了相应关键技术,也提供了一定的支撑条件。

鉴于对人工增雨技术的客观需求和学科本身发展的需要,目前,中国应着手建立大气综合探测飞机实验室,以加大这一领域国家级的科研投入,支持关键科学问题和技术的研究。同时,应对全国水资源严重短缺地区云水资源展开研究和分析,提高合理开发云水资源的规划意见,并在试验示范区内研制相应的人工增雨的监测、作业和效果检验技术,以求明显提高人工增雨的成效,使人工增雨技术达到一个新水平。

(责任编辑 蔡德诚)