

下一代及其以后的核电机组：增强后劲

共同的目标推动着先进反应堆的开发

目前，差不多所有从事民用核动力的国家都在开发现有核电机组的改进型，以便在 21 世纪到来之前实施。由于此类机组一直是以当时的核电机组所积累的经验（累计已达 6000 多堆年）为基础，一步一步地作出各种改进的，因此被称为渐进型机组。想要实现的改进涉及许多方面，从设计、建造和运行，直到安全性和经济性。

这种改进的共同的目标是提高安全性，要使它超过现有的绝大多数机组已经达到的令人满意的水平。对核电与其它实用的大规模电力生产方式所做的公正比较（如 1991 年赫尔辛基高级专家学术会议上发表的结果）表明，核电在减少电力生产对人类生活和对环境的影响方面具有明显的优势。尽管这不是什么新结论，但还是需要反复地讲和适当地加以宣传，以便使常常被耸人听闻的新闻报道搞得晕头转向的公众放心，使政治家们恢复信心，也许有点令人惊讶的是还要使核界内部心存疑虑的人恢复信心。

就本文而言，“安全”一词是指借助技术手段完成下列两项基本任务后产生的结果：第一，使反应堆的设计、建造、运行和维护做到，无论是设备故障、操纵员的差错还是地震之类的外部事件，都不会导致核燃料过热从而使危险数量的放射性漏入反应堆冷却系统；第二，在反应堆冷却系统周围构造和保持一个坚固而密封的安全壳，以

便把按照第一项任务本该终止实际并未终止的事故序列中可能释放的大量放射性滞留在反应堆厂房内。

值得一提的是，几乎所有目前正在运行的反应堆都高度符合国际公认的安全准则。为了做到这一步，人们曾不得不采取措施使许多较旧的机组现代化，如在厂内适当地增加一些设备、应用人机工程学原理改进控制盘、改进操作程序及与之相应地加强对操作人员的培训等。

使人们这样做的一大推动力，来自对 1979 年三里岛 (TMI) 电厂严重事故所做的非常透彻的分析。从全世界不断增加的运行经验中总结出了其它一些教训。这方面的经验正在运营单位、设计单位、研究与开发单位以及审管组织之间公开地进行国际交流。所得出的经验教训是设计下一代渐进型核电机组的重要依据。可以预计，这些经验教训将使安全性进一步提高。这是因为完全可以把前面提到的使旧机组现代化的措施融入渐近型设计中。这远比对现有机组进行小改小革有效。

为了评估或“度量”安全改进措施，设计人员使用了其它工业部门（如航天工业）也正在使用的先进方法。其中之一是概率安全分析 (PSA)。从根本上说，这种方法是按照部件、系统、功能和操作人员的动作之间的各种关联描述或模拟整个发电机组。它要计算起始故障或失误未被某一防御层挡住从而进一步扩展为燃料严重损坏的概率。首先要确定大量起始事件的概率，然后求出有关每一堆年堆芯严重损坏的一个累

C. A. Goetzmann,
L. Kabanov
和 J. Kupitz

Goetzmann 先生是 IAEA 核能与核安全司免费专家。Kabanov 先生和 Kupitz 先生是该司职员。

积概率值。三里岛事故前,这一特征值一般为千分之一左右,现已明显地下降到低于万分之一。下一代核发电机组的目标是至少再降一个数量级。大部分设计单位追求的目标是百万分之一。

这样的概率分析除了可利用这些数字比较各种设计方案在满足纵深防御原则方面的有效性之外,还可帮助和促使设计人员找出设计中的薄弱环节。概率分析可明确指出哪些地方需要改进,并可帮助挑选最佳的专设对策。已经达到的安全水平虽然很高,但预计还能提高。因此,没有理由不将已经在进行的有关渐近型机组的工作(有的目前正在建造,有的处于程度不等的规划阶段)继续长期进行下去。

然而,尽管核电已经取得令人满意的佳绩,但在如何做得更好这一点上专家们争论得很激烈。要做得更好并不是因为已经达到的安全性不够,而是为了追求完美。尤其是,有些人希望通过不懈的努力在重新获得公众认可方面取得重大进步。

可以看出目前有两种观点。一种观点认为,既然现有机组不断增加的经验能为未来的发展提供坚实的基础,则继续沿着渐进路线前进就是合理的,甚至可以说是必须的。在必要之处更进一步提高安全性的工作,完全可以在这条路线的框架内进行。另一种观点主张采用新颖的解决方法,即采用更富有革新精神的反应堆概念,当打算大力发展核动力时尤其如此。下面简要讨论这两种观点。

渐进方案

就增强下一代先进水冷反应堆的安全性而言,目前正在寻找不让严重事故产生燃料熔化之类后果的改进措施。研究严重事故的现象,是世界性的一大研究与发展任务。其目的是更确切地找出影响安全壳实现预定功能的一切潜在问题,以及通过设计手段消除或许能发现的任何薄弱点。这些活动的最终目标是要能够证明,从技术角度看,即使核电厂内部发生严重事故

也没有必要采取撤离之类保护一般公众的应急措施。事故的影响将被限制在厂区内,因此不会干扰厂外居民的生活。

把这一目标变为国际上认可的推荐意见,是IAEA的一项重要活动。国际核安全咨询组(INSAG)——IAEA总干事的咨询机构——制定的原则,非常适合这一用途。但是,为了使称作INSAG-3*的这份报告也能用于超过设计基准事故的这种严重事故,它所阐明的技术安全目标必须加以扩充。此外,有关安全壳的原则需要作某些修改,在确定这些原则的技术含义和后果方面也还有大量工作要做。

革新方案

许多支持未来反应堆采用革新设计方案的人赞成的是另一种观点。他们认为,尽管现在的和未来的渐进型反应堆的安全性是可以接受的,但建造和经常性的维护需要动用的技术体系在功能方面过于复杂,给运营者带来的负担过重。他们主张开发比渐进型机组大大简化的机组,它们的最终安全性将极少(甚至完全不)依赖于专设安全系统的正确发挥作用和操纵员的正确响应。有些支持者还认为,采用这样的革新型反应堆概念,有可能大大提高公众对核电的认可程度。

他们认为,如果将来打算大大发展核电,并将它们扩大到世界上目前对核电技术知之甚少或根本没有与它打过交道的许多地区,则要求采用革新方案的呼声会强烈得多。设计、审批、建造、运行和维护现行反应堆的渐进型后代,需要标准极高的技术资源和人力资源。这就产生了一个问题:是否总能建立、保证和维护这些技术资源和人力资源,以便全世界的反应堆在将来的很长时间内全都能保持所期望的安全

* Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, (INSAG-3), IAEA Safety Series No. 75, Vienna (1988).

性?或者换一种问法,即采用革新型反应堆概念能使这件事做起来容易些吗?这是支持革新方案的理由之一。另一条理由是,也许可以事先在“设计中排除掉”发生堆芯严重损坏的可能性(尽管这种可能性极小),因而最终大大提高公众对核电的认可程度。

简化和使反应堆机组更能抗设备故障和操纵员的差错,是渐进型机组另一个明确的目标。因此,渐进和革新之间的争论很少涉及安全性指标本身,涉及更多的是达到这一指标的方法,因而技术性很强。

多年来一直在讨论的革新概念很多。有些基于轻水堆技术,另一些则源于气体或液态金属冷却堆的开发。其成熟程度不等,从预想阶段直到已经非常细致且以大量的具体研究与开发工作为后盾。然而,流行的观点是,每一种概念都需要建立相应的工业规模原型装置,然后才能被看作扩大核电的一种选择。有些概念甚至还需要进行先验性的可行性检验。

从提出这些概念都是为了改进安全性这个意义上说,它们都试图实现两个大的安全目标。一个目标是降低甚至免除操纵员在控制大事故时动作必须正确这一要求。另一个目标是消除靠强制冷却剂流出所有反应堆燃料元件在核链式反应停止后仍然在释放的余热这种必要性。就此而论,不需强制冷却剂流意味着可以完全不依赖泵之类旋转式机械或驱动此类机械所需的能量。有些概念试图在反应堆冷却剂系统已受到事故性泄漏影响的工况下,也能实现通常所说的“非能动地排出余热”。

尽管解决办法各异,所有革新概念都试图把防止事故的措施最大可能地加到设计中去。使一切起始事件(如大雷雨引起失电)都不会演化成危及燃料元件完整性的事故。在INSAG阐明的3项紧急措施——控制反应堆功率、冷却燃料和将放射性限制在相应的屏障内——中,革新概念更重视前两项。

因此,革新方案把尽可能多的精力放在与纵深防御原则,以及与INSAG的“把

主要精力放在达到安全的主要手段,即预防事故尤其是预防能导致堆芯严重损坏的那些事故上”这一原则相一致的预防工作上。

因此,人们不会因革新方案将偏离具有重要战略意义的某些既定原则而非难它。恰恰相反。尽管基建费用看起来确实会较高,但定能用放宽某些工程要求的办法在电厂设计的其它地方寻求和获得补偿。

与当前已有反应堆的情况相比,革新概念力求较少依赖“安全文化”,这是因为,在紧急情况下,操纵员的响应或某些情况下某些系统的功能,对足够的保护来说不是决定性的。把操纵员的失误、无反应甚至闹情绪对安全的威胁,看成远比设备故障的大,这有些令人惊讶。由此可得出两个结论。第一个结论是歌颂纵深防御的:多重性、多样性、实体分隔,连同操纵员对安全的奉献精神(“安全文化”),其有效性和价值显然已得到证实和承认。第二个结论是:如果系统的简化和人机接口的改进是通过使自动化程度更高实现的——这显然是渐进型机组的目标——则对操纵员的担心就可以大大减小。换句话说,构成革新概念驱动力的那些内容,大部分肯定也可以用渐进型设计来实现。

澄清与通盘考虑

革新型反应堆的某些支持者表明的一个目标,是搞出能称之为“确定性安全的”(deterministically safe)设计。这意味着不必用概率分析数据就能证明这类设计对公众是足够安全的。只要不把它理解为“任何情况下都不会出事”(这是一种很难替它辩解的见解),则渐进型和革新型方案的对立就有可能统一起来。两者的最终目标都是要证明能把对公众有严重后果的事故排除掉。两种方案用以达到这一目标的手段均是确定性的。渐进型设计采用在纵深防御思想的范围内建立交叉重叠的保护层和缓解层;革新型设计则采取临时性的大热阱和大通道之类的特殊设施,以通常所说的

非能动方式排除衰变热。

因此,“确定性安全的”反应堆一词能够包容实现对公众完全没有严重后果这一最终目标用的各种固有的、非能动的、能动的和其它的特性。非能动的、固有的和宽容的等术语使用中引起的许多混乱将消失,因为这些词用于整个机组是不对的,用于特定系统或特定功能则完全正确。对公众来说,这一术语也容易理解得多——公众实际上只想知道自己会不会受到事故的影响,而不是必须对他们几乎不熟悉的技术细节作出判断。

对于从可以想象得出的事故序列中找出哪些事故序列需要作出确定性的防范来说,无论是渐进型机组还是革新型机组,概率论的分析方法仍是必要的。然而必须清楚地说明的是,说到底,“确定性安全的”仅仅意味着严重后果的概率极低,以致它们可以象别的任何大灾难一样被人们所接受。

未来的渐进型机组的每项概率都是足够低的;革新机组不必做得更好。考虑到上述的合格条件,两种类型都可称作确定性安全的。就公众而言,既没有给他们留下难题,他们也不可能提出反对意见。

这是必须在核界内部的专家们之间讨论的问题。讨论的议题一定不能指向哪种概念最安全而不管其费用的高低,而是要指向哪种概念能使发电成本最低其安全水平又是普遍可以接受的。

未来的动机和制约

动机。不能主要从安全角度判断各种革新概念的合理性,而是它们还必须满足其它一些要求。也许最重要的一些要求涉及它们在帮助满足世界日益增长的能源消费量和帮助减轻温室效应方面的潜力。

对工业化国家来说,简化是下一代渐进型机组的一个大目标。然而对于一定会“投身于核能”的欠发达国家来说,这一目标又有多少意义呢?估计今后的装机容量要五倍十倍地大于目前的装机容量,这么

大的装机容量大部分由工业化国家提供几乎是不可想象的。高度的安全文化和充足的基础设施,是发展核电的先决条件。但这一条件严重地阻碍了在全世界大大增加核电的使用量。非常需要对有关费用作出评价,因为它将影响必然要进行的抉择。如果正如所预料的那样费用较高,那么有关这个问题的策划工作极可能是值得仔细研究的一件事。当然,即使能找到适合“低安全文化概念”的办法,也会引出两个问题。第一,它怎么能与传统方法长期共存?审管人员能与这种“二流”反应堆群体相处吗?第二,会不会有这样的买主,他们因为自己不可能做得更好而承认需要这样一种专门概念?难道他们不觉得别人会另眼看待他们吗?

要达到所期望的安全水平,通常依靠正确地把三个关键质量组合好。这三个质量是:机组自身的质量,现有基础设施(如电网)的质量,以及经充分训练的操作人员的质量。如果后两者较弱,那就必须靠机组加以弥补。

制约因素。然而,在快速扩大核电的道路上,无论是基于渐进概念还是基于革新概念,都存在着严重的制约。即使不考虑经济上的有利性、废物的最终处置、当前不能令人满意机组的处理和核不扩散等问题,最重要的制约有如下三项:第一,必须使公众了解和理解核电的好处,然后在此基础上承认其合理性甚至是必要性。第二,必须使工业化国家的公众也认识到,把核电扩大到发展中国家将需要它们在资金方面做出额外的努力。第三,对革新概念的宣传一定不能以对渐进概念方面近期要进行的工作持怀疑态度的方式去做。如果这一点没有得到理解,核选择完全丧失其地位的可能性就会增加。

消除这些制约是一项艰巨的任务。比较好的作法是制订合适的总体规划,相当详细地规定哪项子任务必须以哪种方式完成,以便促成核电在下个世纪二十年代获得蓬勃发展。IAEA当然是制订这项规划的理想机构。□