

# 先进反应堆:安全和环境方面的考虑

## 国际专家对下一代核电机组的一种看法

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

纵观核能的各种非军事应用的发展过程,达到并维持高水平的安全一直是最最重要的一个问题。安全目标不仅一直是通过在大量实验研究和理论分析的基础上完成的精心设计实现的,而且还是通过部件制造、电厂建造、运行、维护和管理方面的质量控制和实践实现的。

在过去的 30 年中,全世界民用核电机组已积累了 5600 多堆年的运行经验。尽管发生了两次大事故,但只有一次造成明显的厂外后果。总的来说,全世界的核电机组已普遍达到了十分令人满意的安全水平。

先进核电机组的安全特性,预计将相当于或优于目前正在运行的最好的核电机组。目前的工作在很大程度上都是在被称作“安全文化”的推动下进行的。建立安全文化已成为任何国家利用核电的先决条件。这个术语的基本意思是不断追求整个系统达到一流,其中也包括与核电机组的设计、建造和运行有关的技术性基础设施和管理工作。

由于最大限度地利用研究成果和全世界 400 多套核电机组积累的运行经验,先进堆的开发工作已经成为促使技术发展的主要推动力。

### 安全原则方面的共识正在形成

在国际这一级,旨在支持下一代核电机组开发工作的各种安全相关活动,正日

Kabanov 先生和 Kupitz 先生是 IAEA 核能和核安全司高级职员。Goetzmann 先生是该司的免费专家。

益引起人们更多的关注。

1991 年 9 月,国际原子能机构(IAEA)国际核动力安全大会的与会者曾建议机构采取一些行动。会议明确要求 IAEA 支持其成员国的下述工作:就未来几代核电机组的安全目标形成国际共识;并制订相应的安全原则和安全指标。提出了一步步地朝拟订出一套全面的安全准则方向前进的方案,并认为国际核安全咨询组(INSAG)的几个文件可以作为这套准则的重要基础资料。

除其他目标外,要求下一代核电机组的安全水平将提高到以致事故性地向环境大量释放放射性的风险与目前的风险相比甚至是可忽略不计的。已使用了很久的纵深防御原则将继续是确保安全的基本手段。实施这个原则涉及到设置多层次的防护,包括设置几道相互独立的阻止放射性向环境释放的实体屏障,并涉及到防止发生序列故障的冗余度和空间分隔。实体屏障按性质划分共有四道:燃料基体、燃料包壳、一回路冷却剂边界和安全壳构筑物。

目前,核设计人员正在努力改进屏障本身和每道屏障所提供的防护能力,以便提高整体安全水平。不过,达到这个目的并不需要每道屏障和相关的防护层都承受相同的负担。显然,第一道屏障的加强会减轻后面几道屏障的负担;第二道屏障的加强亦是如此,依此类推。此外,优先加强前几道屏障,对于保护核电厂的投资和使放射性物质停留在更靠近其产生地,定能提供更大的保证。

虽然所有设计都规定各个阶段都要采

取防护措施,但重视程度因设计概念的不同而有差异。一些渐进型设计已经过严格审查,它们对全部四道屏障都作了改进。在一些革新型设计中,对四道屏障也都进行了研究。但在某些事例中,重点放在第二道屏障上,即放在防止燃料包壳破损上。业主们对保护他们的投资和限制裂变产物外逸的关心,促使他们更加重视事故的预防,并倾向于把更多的重点放在前几道屏障上。

### 开发趋于国际化

调查表明,世界上目前处于各种开发阶段的核电机组概念有 40 多种,这足以使人们深信核电的前景美好。(见下表。)由于概念众多,本文仅就某些一般趋势加以评述。

按成熟程度和经验的多寡排列,大型水冷堆的渐进型设计占首位;其次是中型水冷堆的渐进型设计,这类设计特别重视采用非能动安全设施,使它具有更大的抗事故能力;第三类通常称作革新型设计,包括作了较大的实质性修改的小型水堆,还有一些高温气冷堆和液态金属冷却堆。

一种明显的趋势是,在开发先进反应堆方面,国际合作正在加强。例如:

- 美国同日本和大韩民国在先进轻水

堆(ALWR)方面的合作;

- 加拿大与大韩民国在加压重水堆(PHWR)方面的合作;

- 法国和德国在 ALWR 方面的合作;
- 一些欧洲国家在开发快中子增殖堆方面的合作。

这些例子是不完全的,因为俄罗斯联邦等其他国家也正在争取更广泛的国际合作。

尽管正在考虑的概念很多,设计研究机构也很多,但最终目标很集中而且简单明了:维持并提高核电的经济性和安全性。总的说来,似乎有这样一种一致的看法,即正如 INSAG 所建议的那样,INSAG 发表的那些以运行经验为基础的核电厂基本安全原则应加以扩充,以便把有关未来核电机组的以下几个具体方面包括进去:

- 运行和维护程序;
- 简化的、对用户更友好的设计;
- 恶性事故工况下系统地包容裂变产物的设计;
- 通过专设工程设施来减小重大事故的概率及其潜在的后果;
- 通过专设工程设施来防御破坏活动和常规武器的袭击;
- 考虑非能动安全设施。

这些一般考虑中比较重要的几项将在

| 名 称          | 堆 型  | 功率(MWe)   | 卖主/设计者                 | 国 家              |
|--------------|------|-----------|------------------------|------------------|
| N4           | PWR  | 1400      | 法马通                    | 法国               |
| CONVOY B     | PWR  | 1350      | 西门子                    | 德国               |
| EPR          | PWR  | 1400—1500 | NPI(法马通/西门子)           | 法国/德国            |
| SYSTEM 80+   | PWR  | 1300      | ABB/燃烧工程公司             | 瑞典               |
| ABWR         | BWR  | 1300      | GE/日立/东芝               | 美国/日本            |
| BWR 90       | BWR  | 1100      | Asea Brown Boveri(ABB) | 瑞典               |
| EFR          | FBR  | 1500      | 欧洲快堆协会                 | 比利时/法国/德国/意大利/英国 |
| CNADU        | PHWR | 600—900   | AECL                   | 加拿大              |
| CANDU—3      | PHWR | 480       | AECL                   | 加拿大              |
| AP—600       | PWR  | 600       | 西屋                     | 美国               |
| WWER 500/600 | PWR  | 635       | 液压机公司/其他               | 俄罗斯联邦            |
| SBWR         | BWR  | 600       | 通用电气(GE)               | 美国               |
| PIUS         | PWR  | 600       | ABB                    | 瑞典               |
| VPBER—600    | PWR  | 600       | OKBM                   | 俄罗斯联邦            |
| MHTGR        | HTGR | 4×170     | 通用原子                   | 美国               |
|              |      | 4×80      | 西门子/ABB                | 德国/瑞典            |
| PRISM        | LMR  | 3×150     | 通用电气                   | 美国               |

世界上正在开发的  
先进核电机组的若  
于例子

下列各节介绍。

### 运行经验是基础

从现有核电机组运行经验中得到的反馈信息,正在下一代核电机组的设计中起着重要作用。所有的先进堆设计都最大可能地采纳了先前的经验。顾名思义,革新型设计包含了一些事先没有大量经验可供借鉴的设施或其他措施。

对于先前没有作过示范验证的设计,机组的任何设施只应采纳根据具体情况在部件、系统或全机组级作过充分研究和原型试验后已被采用的那些部件或系统。实绩的证实,包括某些全新设计的安全成绩的证实,也许需要建造全尺寸的示范机组。

**人为因素。**先进核电机组正在设计得易于操作,使运行人员能迅速了解机组的行为,从而有可能减少人为差错。

这些设计能给最大限度地自动响应异常提供足够长的时间(宽限期),操纵员在这段时间内不必采取任何行动。这就使操纵员有时间来评估事件和整个机组的状况,因而能在经过仔细考虑之后再采取认为合适的行动。

人们也正在利用现代的电子、数字和计算机技术方面的进步,例如微处理机、图象显示系统、多路传输、纤维光学等,来改善人一机接口。有组织的和分级的报警显示设备与控制设备、“专家系统”以及改进后的诊断系统等,都是正在改进型核设计中大显身手的已有技术。

### 新设计的重点是简化

大家都认为当前流行的许多核电机组设计过于复杂,不利于运行、检查、维护和修理。不必要的复杂化是引起各种各样问题的根源,因此人们正在高度优先地解决设计的简化问题,尤其是在运行安全受到影响的地方。

先进核电机组的设计和运行的每个方面都正在探讨简化问题。简化的基本精神是,设计中只包括完成基本功能所需的系

统,并通过增加设计余量或非能动地完成基本功能来减少复杂性,控制系统的复杂性也能随之而减小。

核电机组运行的简便性将有助于操纵员更容易执行任务,从而有助于减少人为差错。最后一点,制造和建造方面的简便性,通常也被看作应优先考虑的问题。

顾名思义,非能动安全设施并不依赖于人的动作,而且在某种程度上也不依赖于外部的机械力和(或)电力、信号或外力。相反,它们所依赖的是可自然地起作用的动力源(例如自然循环)和触发机构(例如止回阀)。

“非能动性”有若干级,包括一些能动触发但非能动运行的系统。核电机组采用非能动安全设施,是实现简化和提高完成基本安全功能(即反应堆的控制和停堆、堆芯和安全壳的冷却以及裂变产物的滞留等)可靠性的一种好方法。

非能动系统还希望减少冗余度方面的要求、减少操作的复杂性和对操纵员动作的需求。与能动系统相比,它们有可能达到更高的可靠性,实绩的涨落也较小。非能动系统的一个重要特点是,它们只依赖于事先贮存的、能快速启用的能源,从而能够在全厂断电情况下运行。目前的核电机组中早已在使用非能动设施,只是范围有限。许多先进核电机组的安全系统,正在考虑更多地采用非能动设施。

### 确定论和概率论的安全分析方法互为补充

人们普遍认为,概率安全分析(PSA)对于找出特定设计构形中的薄弱环节来说是非常重要的,它们还能就各种事故情景的发生概率提供宝贵的结果。尽管它有公认的局限性,但不同的几个组织还是提出了几种情况下的 PSA 目标值。例如,INSAG 已就今后的核电机组提出了如下的最低目标值:

- 堆芯严重损坏频度的限值为  $10^{-5}$ /堆年;
- 向厂外大量释放放射性的频度限值为  $10^{-6}$ /堆年。

这些目标值是设计目标。至今尚无证据表明每种设计都能满足这些目标值,有些设计者则可能正在为实现数值更低的目标值而努力。但总的来说,上述目标值被认为是可行的。

不过,纵深防御概念中包含的慎重性,要求我们必须同时采用非概率论方法,例如确定论的分析方法和良好的工程判断,尤其是当 PSA 给出的事故概率很低时。这种双管齐下的做法能最大限度地保证核安全,即堆芯功率水平得到控制、有足够的冷却能力和放射性安全地得到包容。

### 先进核电机组对环境有益

许多反核者都认为,要是首先能把恶性事故问题解决得令他们满意,那核电与以有吸引力的价格提供大量电力的其他常规方法相比就会具有巨大的环境效益。这也是下一代核电机组的设计高度重视的课题。

现有的核电机组是按偏保守的设计要求设计建造的,这些要求则是根据一组被称为许可证审批设计基准的事故人为规定的。今后的核电机组仍将按同样的许可证审批设计基准设计建造,而且还将明确和系统地考虑概率更低的事件。

目前正在一个逐渐在形成的有关一般安全原则的框架内考虑的方案很多。尽管这些方案的细节也许不同,但在努力使任何核事故(不管其严重性如何)的厂外后果减至微不足道这一点上是共同的。这一原则已经成为安全方面的基本指导思想的一部分。

过去曾在上述的设计基准框架内对一些可信的严重事故做过透彻的分析,并且总是把核电机组设计成具有足够多的屏障,以防止和减轻此类事故的后果。过去由于承认或许存在着一些不大可信的事件序列,因而曾要求有很大的设计余量和厂外对策。

结果是相对于其他工业活动的应急计划来说,核电厂的应急计划不得不包括迅速隐蔽和(或)疏散等复杂的规定。这类规

定和相关的应迅速通知的要求,给核电厂业主和必须迅速行动的各公共机构加上了沉重的负担。对核事故情景的一些最新研究和评估结果指出,迅速疏散对公众安全来说也许是不必要的,需要采用更加合理的对策。

为此,未来核电机组的设计者和使用者,已把注意力集中在更现实的事故分析结果和防护战略上,以及防止和减轻事故后果的设施上。这些设施的目的是要把隐蔽和(或)疏散的必要性适当推迟一段时间,并且如果可能,建立一个根本不必采取此类措施的牢固的技术基础。同样,由于切尔诺贝利事件,最近一段时间人们的注意力一直集中在如何确保周围土地和水体不受到可能严重影响公众健康的污染上,或至少在空间和时间方面限制这种污染。人们尤其强调的是应确保污染程度不致要求长期重新安置大量居民。

现在,在纵深防御原则的框架内加强各道屏障,包括相应的事故管理加上吸收最新研究成果和更现实的事故分析结果,已为最大限度地减少和延迟放射性释放提供了技术基础。这将使先进反应堆的应急计划得到简化,并将大大有助于公众对它的接受。

与减小先进核电机组环境影响有关的其他方面包括:减小职业剂量,最大限度地减少废物产生量及改进核燃料循环。

### 技术先进性有助于公众接受

先进核电系统将利用现有系统积累的经验 and 世界上的研究与发展成果。提高安全性和经济性是可以同时办到的,尤其是当实施高度的标准化时。

先进设计可在纵深防御原则的框架内把屏障加强到这样的程度,以致各种恶性事故的厂外后果(万一发生的话)都可以用大大简化了的应急计划程序来处理。

这些不同的设计成功与否,不仅取决于它们的技术先进性,而且取决于公众和决策者的理解与接受能力,即一种总体上有利的核气候。 □

## 有关下一代核电机组的技术参考读物

下列参考文献是从 IAEA 最近出版的一些技术报告中选出的。

*Safety Culture*, International Nuclear Safety Advisory Group (INSAG), IAEA Safety Series 75-INSAG-4, Vienna (1991).

*The Safety of Nuclear Power: Strategy for the Future*, proceedings of a conference from 2-6 September 1991, IAEA, Vienna (1992).

*Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants*, IAEA Safety Series 75-INSAG-3, Vienna (1988).

*The Safety of Nuclear Power*, IAEA Safety Series 75-INSAG-5, Vienna (1992).

*Status of Advanced Technology and Design for Water Cooled Reactors: Light Water Reactors*, IAEA-TECDOC 479, Vienna (1988).

*Status of Advanced Technology and Design for Water Cooled Reactors: Heavy Water Reactors*, IAEA-TECDOC 510, Vienna (1989).

*Gas-cooled Reactor Design and Safety*, IAEA Technical Reports Series No. 312, Vienna (1990).

*Safety-related Terms for Advanced Nuclear Plants*, IAEA-TECDOC 626, Vienna (1991).

*Safety of Nuclear Installations: Future Directions*, IAEA-TECDOC 558, Vienna (1990).

全世界正在开发的下一代核电机组设计有 40 多种。(来源:三菱株式会社)

