

ALWR 候选堆型，一种已被证明可满足电力公司、管理部门和公众的各种要求的堆型，从而为电力公司投资奠定良好的基础，还需要开辟后续的计划——非能动机组第三阶段。

今后的发展方向

EPRI 和 DOE 正在共同为制订这样一项 ALWR 非能动机组的后续计划工作着。DOE 正在着手进行大型非能动机组设计的鉴定工作，工作进程依工业界分摊的费用而定。EPRI 同电力公司 ALWR 指导委员会一起，正在为建立由许多电力公司参加的国际合作关系而奔波，希望这些电力公司共同支助非能动稳定的 ALWR 的设计和开发工作。这项协作计划的目的，是使现有非能动机组设计概念发展到被认为“可以投资”的程度。更具体地说，第三阶段将完成以下工作：

- 一套明确和稳定的管理要求，这套管理要求并经 NRC 对一种或多种非能动机组设计的鉴定实践验证过；

- 一份经电力公司认可、NRC 赞同的要求文件，具体说明美国和国际的电力公司的设计要求；

- 以 36 个月建成非能动机组为目标的各种具体建造计划；

- 论证事故的预防和缓解目标已经达到的概率风险评价 (PRA) 和事故分析报告；

- 通过以功能为基础的任务分析，对人—机衔接作出明确规定。

作为第三阶段工作的一部分，各电力公司将向非能动机组的设计工作提供可直接应用的财政和技术资源。

EPRI 和现有的 ALWR 计划参加者目前正在工作，以勾划出这个重要的第三阶段。这项工作正同 DOE 资助的一项大型计划紧密地进行协调，后者是以支持机组设计的鉴定工作为目的的。DOE 的上上下下对这个第三阶段充满热情、干劲和非常大的期望。

总之，全世界都在积极研究先进非能动轻水堆的要求和设计。这些设计同目前的机组相比，有希望做到技术更简单和经济上更有竞争力。但愿这些设计能够成为美国和世界其他国家扩大与重振核动力事业的基础。

当前轻水堆的发展

概述核电机组要求及全球趋势

P. -J. Meyer 和 W. Grüner

核反应堆已在世界电力生产市场占据重要位置，它在 1988 年提供的电力，约占世界总发电量的 17%。1988 年年底时，全世界运行中的核动力机组共 429 套，其中 320 套是轻水堆 (LWR)，相应的总装机容量稍多于 263 吉瓦电 (GWe)，约占目前核电总装机容量 (约 311 GWe) 的 85%。全世界目前正在建造的 105 套核动力机组中，有 79 套是轻水堆。这些数字清楚地说明，就核电对电力生产的贡献而言，LWR (包括压水堆 (PWR) 和沸水堆 (BWR)) 起着辕马的作用。美国、苏联、法国、德意志联邦共和国、日本、大韩民国等许多国家都选用了 LWR，因为事实证明它们可靠性高，经济生存力强。

由于 LWR 被广泛采用，已积累了几千运行堆年的经验。这些经验为今后的发展奠定了基础。在轻水堆的发展方向中，有一些是对目前的设计进行渐进式的改进，能导致系统设计简化、建造时间缩短、维修更加容易、堆芯设计优化、堆的可运行性和可靠性得到改善，并导致建造、燃料、运行和维修费用的降低。在美国，正在开发大型的 (1200 MWe) 渐进型核电机组和较小的 (600 MWe) 非能动型核电机组的反应堆概念，其基础是美国电力研究所 (EPRI) 经过卖主和电力公司若干人·年的共同努力之后编制出的设计要求，其中有一些是经济指标。

轻水堆的各种发展计划，不管它涉及的是设计、建造还是运行，大多以高度成熟而可靠的技术为基础，这就可以使运营者和主管部门双方都比较容易地给新一代的 LWR 办理许可证。甚至根据 EPRI 的要

Meyer 和 W. Grüner 两位先生分别是设在德意志联邦共和国埃兰根的西子公司 / 电站联盟的副经理和总经理。

求设计出的较小型反应堆的概念，使用的系统和部件，也都是能在其他核电厂中找到参考标准的。EPRI 的大多数要求，涉及一些在核电厂的规划、建造和运行中一直感到棘手的问题。

当前核电机组的特点

为了正确地评价当前核电机组与有关新一代核电机组的种种建议之间的相对状况，必须建立一个参考标准，有了它才能判断新机组在安全性和经济竞争能力方面究竟革新或改进了多少。

新的设计概念要求在可建造性、可运行性和安全性方面有许多改进。但是，就象对待每种想要投放市场的新产品那样，必须对照每个方面所能达到的最新技术水平核对这些要求，这一点是很自然的。这里，从联邦德国最近完工的成批建造 (Convoy) 核电机组中选择几例，来说明当前的工艺技术水平。最近开始商业运行的 3 套 1300 MWe 压水堆 Convoy 核电机组，是在原定预算没有超支、每套机组平均比合同规定期限提前 4 个月的状况下移交给业主的。这说明甚至在公众对核动力情绪日渐变坏的情况下，为使项目顺利进行而采取的各种措施仍然是十分成功的。此事说明，扣除特殊事件（诸如法院下令中断工程的进行）的影响，用 4.5 年的时间建造一套 1300 MWe 大型机组是比较容易实现的。从理论上说，用不到 4.5 年的时间建成一套较小型核电机组是可行的，因为这种机组的设备数量和混凝土浇灌量都要少些。

对于那些虽说不特别大、但费工费钱的物项（如阀门、管线、支撑物、预埋件和电缆支架等）实施全面的标准化，就可以使建造周期缩到这么短。在法国和日本也已见到相同或类似机组的建造周期确已缩到这么短的事例。这些部件在核电站中的使用量很大，而且有严格的质量要求，其型号和规格的数量已得到限制。这些部件是在计算机数据库的帮助下组装的。采购、制造、安装和质量控制用的所有文件，也是利用这些数据库编制出来的，这样得到的文件内容完整，前后左右能保持一致。

良好的可运行性意味着，在发生内部和外部瞬态事件期间电厂不会中断服役、在跟踪负荷需求方面比较灵活以及换料停堆期短。在过去的 8 年中，联邦德国一直保持着较低的意外停机率，大约每堆年一次。借助于一套专用的控制系统，有可能具备自动地适应特定电网的工况（例如因功率起伏或频率控制需要而

调节功率输出），以及在一台一回路冷却剂主泵停机的情况下继续运行的能力。这一系统被插在正常控制系统和反应堆保护系统之间，其功能是使超出正常控制范围的那些参数的瞬变过程稳定下来。

换料停堆期之所以比较短，一方面可归因于操作人员事前做了细致的准备，另一方面可归因于设计人员在设计核电机组时采取的许多措施所提供的方便。此类措施的主要实例有：安全壳在运行期间的可接近性较好，燃料水池设在安全壳内、必须进行在役检查的焊缝数量大大减少，以及维修和检查用的设备比较高级等等。

非能动安全设施早已被目前的水堆设计所采用，现在只不过是在开发新的反应堆概念时更多地注意应用非能动安全原理而已。然而，对每座具体的反应堆来说，只有将固有安全特性以及能动和非能动安全设施互相组合起来，才能确保总体上达到较高的安全标准和满足防备一切可想象事件的纵深防御要求。在不同的设计中，这些安全因素各自所占比例可以不同，因为有些设计能更加有效地利用非能动安全特性。

获得许可证的可能性是安全工作中的一个重要方面，只有在考虑已有的、十分成熟的和已获得许可证的设计的前提下，一小步一小步地不断改进核电机组的设计，获得许可证的可能性才比较大。至于新的革命性的安全概念能否获得许可证，极大地依赖于该国办理许可证方面的政治气候，以及是否普遍认为所有安全措施足以满足既定要求。

对未来核电厂的要求

不同国家在未来反应堆概念方面的想法差别很大。法国和德意志联邦共和国已研制出了高度标准化、成熟和可靠的技术，并拥有极好的运行记录。

德意志联邦共和国以 Convoy 技术为基础，正在规划在下一代 PWR 中要引入哪些改进。法国电力公司 (EdF) 对待它的渐进性计划，同样将遵循改进设计而不作大变动的原则。为了制订 2000 年及其以后的法国压水堆标准，EdF 开辟了一个称为“REP-2000”的研究项目。主要研究对象是：负荷跟踪能力、成本效益比和运行灵活性。为了进一步改善燃料在 PWR 堆中的利用效率，法国的 3 个伙伴（法国原子能委员会、EdF 和法马通公司）已联合开辟了一项评价谱移式可转化反应堆 (RCVS) 可行性的计划。预计 RCVS 要到 2002 年或 2005 年以后才

能完成，详细的设计研究也要到 90 年代早期才会进行。

在日本，开发大型 PWR 和 BWR 的工作正在顺利进行；改进型压水堆（APWR）由日本三菱重工业公司和美国西屋电气公司负责设计；改进型沸水堆（ABWR）由日立、东芝和通用电气公司负责设计。日本东京电力公司已为柏崎—刈羽厂址的下两套机组选择了 ABWR。日本下一代 LWR 的技术开发要到 2005 年以后才能大功告成。为了满足未来的社会和经济的需要，下一代的这种反应堆将进一步增强堆芯的各种功能，包括使用混合氧化物燃料（MOX）组件、改进燃料的使用效果、改进安全设计技术、使用更先进的技术，以及改进抗震技术等等。

从核电厂开始建造和运行时起，安全问题就占据着突出的地位，而且将继续如此。为此，制订了包罗万象的成套法规、规则和条例（包括国家一级和国际一级），并在此基础上建立起由本国管理部门和国际机构组成的严密的管理监督网。为了确定核电厂需要哪些安全措施才能把公众的健康和安全风险限制到可接受的水平，往往要经历一套冗长而繁琐的审批程序，包括各种公众意见听取会以及提交行政法庭前常常要遇到的种种诉讼。然而，尤其是切尔诺贝利核事故之后，公众对核电一直持非常保留的态度，因为他们对核能风险的认识与真实情况之间有着相当大的差距。

究竟哪些安全措施能在不久的将来有助于改善公众的接受能力，这是一个难以作出决定的问题，但一般认为下列几条原则所能够指出的方向是正确的：

- 现有核电机组一定能够继续良好地运行下去，因为日益丰富的运行经验的反馈是保证核电机组安全运行的一个关键因素。

- 鉴于运行中核电机组的年龄结构（德意志联邦共和国的核电机组约有一半不到 10 年），并考虑到核电厂延长寿命的可能性（此事目前正在研究之中），加之新老机组安全概念是兼容的，因而两者必将并存几十年。

- 新设计的核电机组，特别是建在新厂址的那些机组，应当有能力把超核电厂设计基准事故的后果限制在厂界以内，因而不必在其周围地区采取应急措施。

要把这些相当笼统的原则转变成可供核电厂设计人员使用的比较具体的实施细则，仅仅在一国基础上肯定是办不到的。实际上，切尔诺贝利核事故的冲

击，已使人们更加认识到，核安全确实是一种带国际性的问题。电厂安全性的进一步改善，必须以各国协调一致的方式进行。在欧洲共同体范围内，1992 年后肯定要这样做，届时必须就正常运行和异常工况的适用法规和标准达成协商一致的意见，至少在核电厂环境影响方面要这样做。可以预料，那些尚没有利用核电的共同体成员国，也可能愿意在这种协调过程中发表见解。

联邦德国的核电在电力市场上所占的份额，在过去 10 年中已增加了 3 倍（即从 10% 增至 40%），这是核能具有经济竞争性的最好证据。1992 年以后，联邦德国能源市场的形势可能会有所变化，因为欧洲共同体的目标是在共同体范围内取消对货物和劳务流动的管制和消除壁垒。世界市场能源价格的可预测性大概不会比过去好多少，因此，应把发电成本的设计指标慎重地定在共同体内的最低预计水平上。因此，很可能要用法国的核电成本作代表。法国较早实现了堆型合理化及核电机组的系列生产，这对于它的核电机组达到目前的这种出口规模是有帮助的。

尽管如此，一些电网容量较小的国家，目前也正在考虑把核能作为一种可能的选择。这些国家有些没有足够的本国能源资源，他们不得不进口能源。从稳定未来能源市场的角度考虑，可以认为这些国家是较小型核电机组的潜在用户。较小型机组除发电成本低外，与大型机组相比，所需预算较少，这一点也是至关重要的。而且，在国家的能源发展计划中引进核能，还会带来一些附带的效应。如在核电厂的建造期间，需要工业部门提供大批各种各样的合格设备。稍后，在核电厂的运行阶段，为使其长期可靠地运行，需要有一个装备精良且工作极有成效的服务性行业的支持。

今后的发展趋势

在通过几个实例介绍了轻水堆技术当前水平的现状之后，现在我们可以来考察一下核电的哪些方面在未来是最有希望进一步得到发展的。在上面勾划出的总趋势中，下述的几个方面是值得进一步注意的：

- 为了大大缩短建造时间和降低造价，应在离开核电厂实际开工还很远时就编制好一套完整的标准化的规划文件和施工文件。随着整座核电厂各项工程的相继竣工，系统和部件的标准化，以及施工图纸、调试程序和资料成文办法的标准化，都是极为重要的。

• 使燃料和堆芯设计进一步最优化和特别注意改进燃料管理方法的主要动机, 是为了实现下列目标:

(1) 降低燃料循环费用, 办法是: (a) 使压水堆平均卸料燃耗提高到 45—50 兆瓦·日/公斤铀; (b) 通过设计最优化和实施先进的堆芯管理方法提高铀的利用率; (2) 通过改进堆芯和工厂的设计改善运行的灵活性: (a) 燃料循环周期可长可短, 最长可达到 2 年; (b) 应变能力扩展; (c) 充分考虑当前和今后对负荷跟踪运行的要求, 要在很宽的功率范围内跟上每分钟为 10% 的变化; (3) 节省天然铀资源和进一步推广后处理技术, 使铀得以返回利用。为实现这些目标而需要采取的各种措施, 不是彼此孤立的, 因此有必要对所有能起好作用的因素, 进行认真而全面的评价并使之最优化。

• 通过各种监测系统的适当组合并使之一体化, 对一回路压力边界进行预防性监测的这种技术早已有了, 它们分别涉及泄漏、振动、疲劳和零件松动等项目。从中取得的资料, 将有助于延长预防性维修的时间间隔及提高压力边界的可靠性;

• 专设安全设施设计中包含的安全裕量应进行审查, 应考虑到过去几年间从与安全有关的研究与发展工作中获得的许多新知识, 这些工作是几个研究单位以国际合作方式完成的。

• 由此所取得的成果, 可用于正在进行的有关超设计基准事故管理程序的研究中去。目前正在研究在出现偏离正常运行的瞬态工况时需要操纵员采取行动以前的宽限时间问题, 希望这段时间能够比现行设计基准值 30 分钟更长一些。

• 发生瞬态事件期间对电厂的监测, 及充分调动电厂资源用于相应的对策, 可以获得电厂基本状况方面的完整而正确的资料。利用在 Convoy 电厂中首次采用的那种过程信息系统, 已经在人-机衔接方面获

得进展。这种系统通过交互式显象设备, 以对值班操纵员最为适宜的方式, 处理和集中显示电厂参数方面的全部有关信息。目前正在进一步开发全面数字化的系统;

• 应细心地评价将非能动部件引入带有非常精确的驱动机构的专设安全设施的可能性, 以便使之简化。这将使维修变得容易, 因而减少辐射受照量, 也可能有利于可利用率的提高。

在可建造性和可运行性方面, 今后的发展工作将集中在保持和改善核电的经济性, 以适应能源市场变化莫测的情况。缩短建造时间及延长两次换料停堆之间的运行期, 是最有希望的两个项目。

国际市场问题

可以预料, 在今后十年内, 从大型和小型核电机组发出的电力将增加。在许多国家中, 规划厂址、许可证审批和工程研究等都早已在进行, 他们在为扩大电网需要增加核装机容量之日作准备。为使销售活动一体化, 法国法马通公司和联邦德国西门子公司最近已同意组成一个联合公司, 将来负责在国际市场上销售将要研制出的核电机组。在日本, 美国的卖主和日本的许可证持有者一直在联合开发 APWR 和 ABWR。

目前, 订购未来核电厂的国际市场仍然不景气, 因为大多数工业化国家的近期能源需要处于低速增长状态。另一方面, 发展中国家的能源需求虽已显示出或预计会显示出较高的增长速度, 但今后几年没有能力投资核设施, 或者说核电的发展受到预算方面的限制。因此, 促进核电发展的主要任务不仅仅是解决技术问题, 而且还要研究筹资模式以解决这个国际性的难题。

