

# 核动力厂：利用概率安全分析增强运行安全

## 概率安全分析在为多种需求服务

L.Lederman 和 B.Tomic

概率安全分析 (PSA) 于七十年代中期引入商用核动力界，它是可靠性分析这个老工程学科合乎逻辑的延伸。到目前为止，全世界在核动力厂方面完成了 70 多项 PSA。这些研究成果所提供的安全知识，是用其它方法无法得到的。在拥有核动力计划的多数国家中，PSA 已成为进行安全评价的标准工具。

简言之，PSA 是一种系统工程方法，它模拟电厂对可能危及其安全运行的一组初始事件的响应情况。为了研制所需的模型，需要用到有关电厂的设计和运行的各种详细资料。研制一些基础性的模型（如失效树或事件树）的目的，是找出成功或失败的路径。在分析这些模型时，要考虑许多因素，包括部件的随机故障、共因故障、人为差错，以及试验和运行策略等。

为了对管理机构的担心作出响应，或为了证明核动力厂的运行对公众的风险很小，一些电力公司（例如美国的郇山核电厂和英国的塞士威尔核电厂）已经开辟了若干 PSA 项目。其他一些 PSA 项目都一直是由管理机构为促进和开发这种技术的应用而发起的。

### 本国电力公司的参与

使用 PSA 的经验表明，电力公司对于这项研究的态度（不只是提供经费），决定着研究工作的质量和成果的有用性。就这一点而言，使电力公司特别是运行人员，在研制电厂模型阶段就及早地参与是很重要的。这将有助于确保所用条件是符合实际的。此类条件包括所考虑的事故初始事件的完整性和它们

的组合方式；电厂的响应和系统之间的相互作用，供第一线系统使用的成功判据，试验和维修政策；运行程序；以及操纵员的行动。

针对特定电厂的研究，应该最大限度地使用该厂得到的一切资料，包括从过去的运行经验中得到的数据。但是，最重要的是电厂和电力公司的管理部门要承诺将采取由 PSA 所指出的包括设计变更或运行变更在内的相应行动。

1988 年 11 月，美国核管理委员会 (NRC) 要求电力公司进行“单个电厂大检查”，以便在概率分析的基础上找出会导致恶性事故的薄弱环节。NRC 的这个行动推动了人们更加积极地应用 PSA，并在极大程度上鼓励电力公司作出上述承诺。

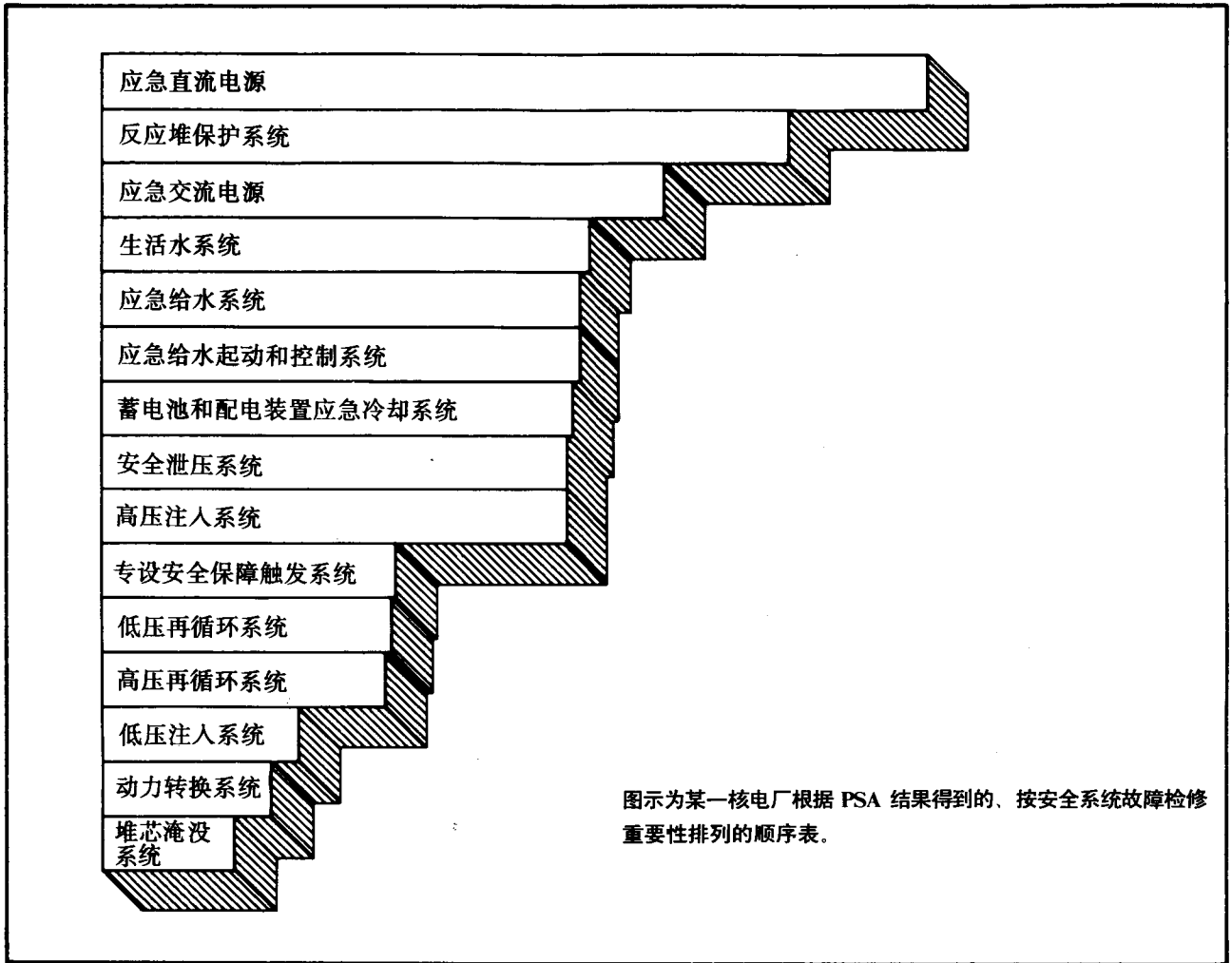
在包括西班牙和瑞典在内的其它一些国家中，已经要求电力公司利用 PSA 进行安全评价。在法国，法国电力公司即将完成一项 PSA 研究，该项研究完全是以特定电厂的资料和数据为基础的。对于相同的许多核电厂来说，该项研究是有代表性的。

### “活的” PSA

PSA 的性质——即详细地模拟各个系统，并用部件的基本故障和人的动作表示出事故顺序——有时使未直接参加研究的人难以完全理解它的结果并从中得益。PSA 报告超过厚厚十大卷的情况是屡见不鲜的。事实上，最近的某些研究报告附了 10 000 多页的附件，其中载有电厂各个系统的具体模型。

得出研究成果之后，PSA 还需要不断地更新，要把结果表达成易于查询和检索的形式。由此出现了“活的 PSA”这一概念，而且正在日益受到人们的注意。

L.Lederman 和 B.Tomic 先生是 IAEA 核安全处工作人员。



信息技术领域尤其是个人计算机计算能力方面的许多重大发展，已为解决其中的某些问题提供了帮助。目前正在开发个人计算机用软件，便于选择性地查询 PSA 结果的个人计算机用软件、模型和数据也一直在更新。(后面将简单地介绍一种软件。)

这些发展使人们能更好地利用多种多样的 PSA 结果。它们也已帮助人们避免把“最基本的”结果——诸如堆芯全部熔化频度——看成 PSA 所能导出的主要知识。事实上，PSA 结果能提供的好处很多，它们可使电厂管理部门更有成效地集中和按轻重缓急使用可利用的资源。(见附图。)

#### PSA 结果的应用实例

从总体上说，当前使用 PSA 的情况可分为两类：电厂小修改；和运行管理（包括运行政策、电厂状况分析和操纵员培训）。

电厂小修改。PSA 研究的结果，通常能指出在电

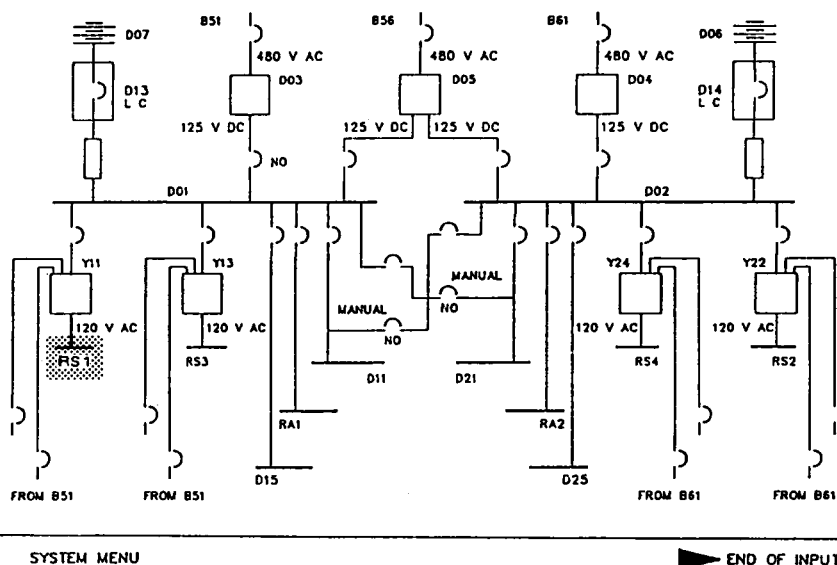
厂设计的哪些地方加以改进就能产生最大的效益。这些结果常常被电力公司用于规划设计的修改，评价由管理机构所建议的或所要求的修改在安全方面的意义。

美国电力研究所 (EPRI) 最近发表的一份研究报告，报道了美国 10 个电力公司列举出的 26 项 PSA 的应用实例。\* 下面是一些电力公司已经从针对特定核电厂进行的 PSA 中获益的几个例子：

- 在康涅狄格州的磨石-1 核电厂，曾证明要求设置多样化测试设备的那条管理要求对安全是没有意义的；由于采用了另一项改进，则节省了约 250 000 美元。在另一个例子中，该厂获得了可以免除对许多电动阀门的合格性进行审查的好处，从而节省了 200—300 万美元，还避免了假如进行这项

\* “The Practical Application of Probabilistic Risk Assessment”, EPRI, NP-5664 (March 1988).

DC POWER SYSTEM SCHEMATIC



目前已经开发出一些供个人计算机用的软件，这些软件能将 PSA 的结果应用于核电厂的安全管理。此处所示为 PRISIM 软件两幅计算机屏幕显示的复制件。上图为该电厂直流电源系统示意图；下图为在 120 V 交流总线停役情况下的危险性含意信息，以及带有附加信息标题的计算机屏幕菜单。（该软件仅备有英文版。）

RISK IMPLICATIONS OF THE CURRENT PLANT STATUS

11 IS THE RISK FACTOR WITH THE FOLLOWING EQUIPMENT OUT OF SERVICE

120 V AC Bus RS1 Fails to Provide Power

MENU FOR ADDITIONAL INFORMATION

- 1. Ranking of safety-related equipment
- 2. Ranking of core melt scenarios
- 3. Improvement from repair
- 4. Return to Control Screen

工作必然会带来的职业性辐射照射。

●在马萨诸塞州的扬基核电厂，获得了安全壳的一批贯穿点免除管理机构要求的效果，从而节约 1600 万美元。还是这个电厂，在柴油发电机冷却

水阀门供电设备中发现了一个重大的设计缺陷。

●在密执安州大岩角核电厂，成功地解决了一大串管理问题，估计节省的开支总计达 2000—4000 万美元。该电力公司把保证电厂正常运行的重担

交给了 PSA。

● 在南卡罗来纳州卡塔贝核电站，发现并解决了一旦发生全厂停电时可能出现的系统故障。

运行管理。有核电站在运行的国家，已经规定了一些运行限值和条件，这些限值和条件常常被称作指导核动力厂运行的技术条件。

在多数情况下，这些技术条件是建立在工程判断或常识之上的，也许未从安全角度加以最优化。某些要求给运行人员造成的负担也许太重，也许会导致不必要的辐射照射。就这一点而言，可以利用 PSA 结果从系统工程角度判断这些技术条件中的要求。此类结果在判别某些运行条件（尤其是监视试验间隔和容许停役时间）的技术基础是否合理方面非常有用。

监视试验的目的是探测潜在的故障，因而也是控制风险的一种方法。但如果试验过于频繁，试验本身也会因引起电厂工况变化或使某些部件临时停役等而增加风险。从运行角度看，监视试验的间隔长一些有利，但这样做于确保电厂的总体安全性也许并不合适。容许停役时间的长短也有类似的两面性。

鉴于这些事实，人们认为 PSA 对于分析与监视试验和停役次数有关的技术条件来说是有用的，其目的在于改善电厂总体安全性的管理，同时容许运行方面有更多的灵活性。目前，美国和北欧国家等国家正在以 PSA 方法为基础对技术条件进行评价。

电厂状况监测。直到前不久，PSA 中所包含的大批资料，基本上一直是按静态和有限的方式在被人们使用，其中的一个原因是，即使为了反映系统运行期间的真实配置而必须作出的小变动，也要重新进行大量的计算。

在 1987 年由 IAEA 召集的一次会议上，讨论了在个人计算机上利用 PSA 资料进行逐日的运行安全管理方面的工作。\* 会上介绍了一种可供个人计算机使用的软件包（称作 PRISIM），这种软件包能用于查询已完成的 PSA 结果，给电厂运行人员和管理机

\* 有关这次会议的报告，请参看 *Improving Operational Safety Management through PSA on Personal Computers*, IAEA-TECDOC-480 (1988)。并参见“PRISM-A Computer Program that Enhances Operational Safety”, by Fussel, J.B., NUREG/CR-5021, Vol.2 (March 1988)。

构的视察员提供方便。例如，电厂操纵员就能利用该软件包对下述情况进行判别，即假如为了试验或维修目的而使设备的特定组合在特定时刻停役的这种做法，会对安全有什么影响。电厂视察员则能快速查阅这方面的 PSA 结果，以便作出例如已停役设备是否恢复服役或如何确保其它设备处于可运行状态的决定；以及根据部件和系统出现故障的趋势及它们对运行安全的重要性，作出视察工作日程安排方面的决定。（见第 41 页附图。）

操纵员的培训。从 PSA 获得的知识，对于培训核电站操纵员，特别是培训他们应付恶性事故的能力来说是十分有用的。在 PSA 中研究过的潜在事故情景多种多样，包含着电厂对已观察到的和预期的各种

#### IAEA 在 PSA 领域的活动

类 别	活 动
交换科学情报	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 技术委员会会议、学术会议、研讨会、大会和有关的出版物</li> </ul>
拟订标准	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 核动力厂进行 PSA 的细则</li> <li>● 有关人为差错概率的专用细则</li> <li>● 有关外部危害的专用细则</li> <li>● 有关共因故障的专用细则</li> <li>● 有关 PSA 计算机程序的专用细则</li> <li>● 有关可靠性数据的收集分析的专用细则</li> <li>● 有关管理同行评议用程序的专用细则</li> <li>● 概率安全判据</li> </ul>
培训	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PSA 管理人员培训班</li> <li>● PSA 分析人员培训班</li> <li>● 特定 PSA 课题的讲习班</li> </ul>
技术合作和技术援助	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 向成员国派出工作组帮助规划和实施 PSA 计划</li> </ul>
推进研究和发展	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PSA 用数据的收集分析协调研究计划</li> <li>● PSA 事故顺序基准研究协调研究计划</li> </ul>
经常业务和服务	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 国际管理同行评议组评议成员国的 PSA 结果</li> <li>● 用 PSA 的知识评价核动力厂运行经验</li> <li>● 利用 PSA 的成果进行核动力厂运行安全管理 (PSAPACK)</li> </ul>

事故起因的响应情况方面的宝贵资料。这些事件顺序把多个系统故障和人为差错组合在一起，并且就其本性而言是一些可以导致堆芯损坏的罕见事件。因此，核电厂的操纵员必须了解这些情况。使操纵员参与 PSA 的开发工作，是一种自然的培训方法。

PSA 的知识对于拟订应急运行程序也很宝贵，对于在模拟器上进行的操纵员培训也很有用。在一次 IAEA 的技术委员会会议上，法国电力公司报道了它们在全景模拟器上培训操纵员时使用过的两种基于 PSA 的事故情景。\*

### IAEA 的活动

IAEA 根据由 1986 年切尔诺贝利核电厂事故的经验教训所形成的高度优先的推荐意见，最近在 PSA 领域组织了一些活动。PSA 的计划包括三个截然不同的组成部分：(1) 通过审议各成员国在利用 PSA 方面开发出的技术，促进、帮助和便利 PSA 的

\* 有关这次会议的报告，请参看 *Experience with Simulator Training for Emergency Conditions*, IAEA-TECDOC-443 (1987)。

使用；(2) 帮助制订如何使用 PSA 的实施细则；(3) 帮助成员国将此类 PSA 实施细则用于增强核动力厂各种运行方式的安全性。(见附表。)

制订 PSA 实施细则的目的在于为进行 PSA 和报道 PSA 结果建立统一的办法。这些实施细则将以今后的 IAEA 安全丛书报告的形式出版。对于分析方法的成文办法和 PSA 结果的显示和解释办法，正在给予特别的注意。这一工作的目的是为了解决与 PSA 报告的复杂性和多样性有关的许多问题。

为了满足快速而方便地查阅 PSA 结果的这种需要，IAEA 已开发了一个进行 PSA 工作用的软件包，代号为 PSAPACK。关于推广这个计算机程序，以利于将 PSA 结果用于支持核动力厂安全管理工作，现在已经开始。PSAPACK 是专供个人计算机使用的并已由 IAEA 广泛分发。

PSA 既然在核电厂安全的总体管理和评价方面有着如上所述的实用价值，它在支持 IAEA 的其它安全活动方面也就拥有巨大潜力。此类活动包括：核动力厂运行安全的审查；制定有关核动力厂运行实绩和发展趋势的数字指标；以及评价核动力厂异常事件的安全意义等。



法国卡特农核电站。(来源：Framatome)

