

不同能源系统的事故危险比较

多大的危险是可接受的？

STEFAN HIRSCHBERG 和 ANDRZEJ STRUPCZEWSKI

尽管电力在我们的生活中是十分需要的，但它并非“有益无害”的。至今没有一种电力生产技术达到了完全没有危害这一目标。

在各种能源系统的所有社会危险中，潜在事故的社会危险仅占一小部分。尽管如此，但大多数公众的注意力往往放在事故的危险上。显然，假如特定能源系统的伴随危险达到了社会不可接受的程度，则它们的发展就会减缓甚至完全终止。

多大的危险是可接受的或者说不可接受的呢？这是一个与多种因素有关的问题，其答案不仅取决于能源分析家对事故频度和事故后果的客观评估，而且取决于公众的危险意识。这些意识也许包括：公众对大灾难、对癌或遗传病之类的某些疾病，以及对环境受到破坏的厌恶感。

尽管公众的意识会影响决策者，但客观的科学评估理应是作出明智的能源选择

决定的依据。为此，国际上正在从各个角度开展工作，IAEA则通过其安全计划一直十分关心客观地和有证据地评估事故危险这个问题。

多年来，专家的合作使形成必要的和理想的比较不同能源系统事故危险的氛围成为可能。由于比较危险评估的成果通常提交给决策者，以支持能源系统的新发展，因此，用于分析的数据最好与被考虑电厂的实际安全特性相一致。分析时应覆盖能源链的所有阶段，即使其中的有些阶段发生于本国或本地区边界以外；石油、煤炭或铀的开采和运输就可能属于这种情况。

另外，尽管死亡事故对事故造成的损失和公众意识的影响最大，但事故严重程度的指标应覆盖各种各样的后果。用以评价事故危害的数据应该是最新的，并应考虑新的技术成就，但对预计要花费较长时间才能实施并推向市场的技术改进不要过

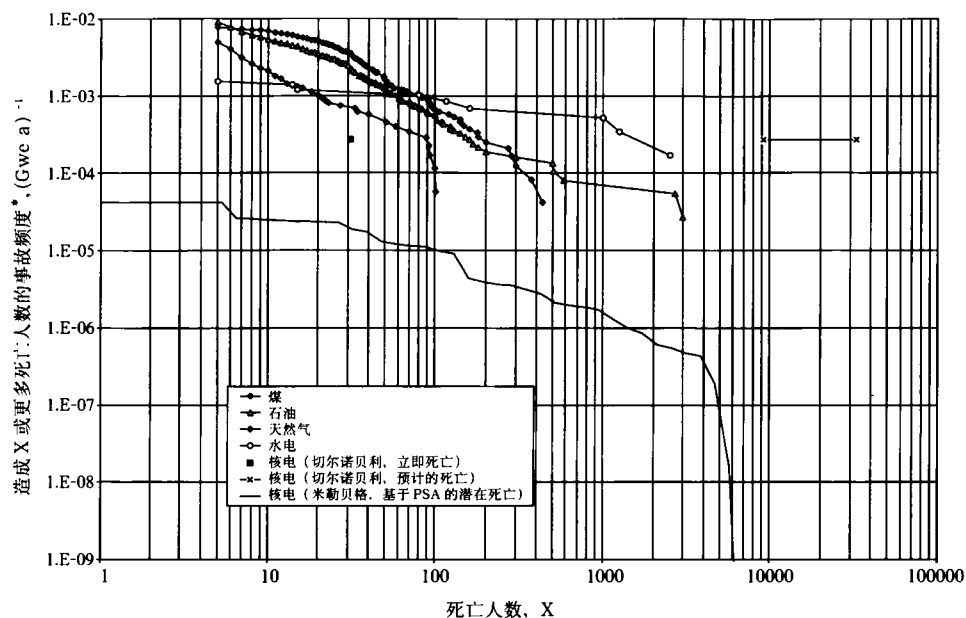
多地考虑。

瑞士 Paul Scherrer 研究所 (PSI) 进行了一项满足这些要求的研究。该项研究的题目为“能源部门的严重事故”，历时 5 载，包括建立了一个最大的有关电力工业各个分支内发生的事故的数据库，其研究成果最终于 1998 年 11 月发表。与早期的评估事故危险的许多尝试显著不同的是，PSI 的该项研究对众多因素做了评估。

该项研究考虑了每种能源系统整个寿期内的事故危险。它还分别提供了与发达和不发达国家有关的数据；鉴于事故沿着整个寿期分布在不同的国家，因此根据不同的情况考虑了这些危害的分配；并把这种评估建立在每种能源系统的真实的工艺技术数据基础之上。本文引

Hirschberg 先生任职于瑞士 Paul Scherrer 研究所，Strupczewski 先生是 IAEA 核设施安全处职员。

不同能源链导致死亡事故的频度



*图中煤、石油、天然气和水电链的曲线基于全球1969—1996年期间实际发生的事故，示出的是立即死亡人数。对于核电链，立即死亡用一个点（切尔诺贝利）表示，缓发死亡用那个事故的一个取值范围表示。瑞士米勒贝格核电站的事故结果源自针对该电厂的概率安全分析（PSA），反映的是潜在死亡。

用了PSI的研究结果，因为，在我们看来，这些研究成果是与能源系统有关的事故危险比较分析方面最全面、最有深度的。

人们已获得了核工业方面的大量事故危险数据。有的是通过美国核工业界推行的“单个电厂考察”计划获得的，有的来自在许多国家进行的并得到经济合作与发展组织(OECD)和IAEA支持的概率安全分析(PSA)的结果。

这些数据，连同1995年欧洲委员会“ExternE”项目公布的各种能源系统每日的

“正常”事故危险数据，使得比较电力生产领域内的各种事故的社会危险成为可能。

核安全要求

在核电站建设的初始阶段就制订了首批安全要求。目的是将核发电的危险降至最低。在过去的40年里制订并修订了若干重要的核安全原则。

IAEA支持将所有核安全原则引入新的和已有的核电机组，包括原先的设计不符合当今安全要求的那些机组。许多国家中正在进行的工作

都是在IAEA总干事的咨询机构——国际核安全咨询组(INSAG)制订的安全目标*的指导下进行的。

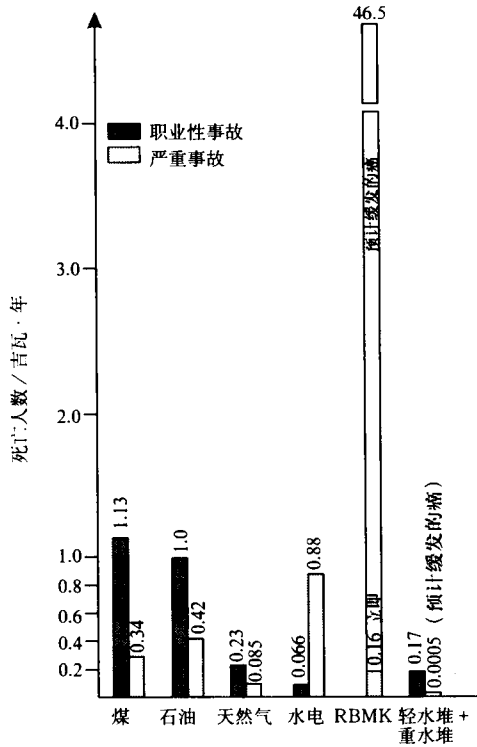
许多国家已经拟定了各种方案，并规定了涉及堆芯损坏的核电机组假想事故的危险标准。

在《美国核管理委员会1983年政策声明》中，美国制订了一种方案。按照这个方案，核电厂周边地区(1英里内)的关键人群组因核电引起的个人早死的死亡危险应限制在因其他事故导致的立即死亡危险总和的0.1%以内，核电厂附近(10英里)居民的个人癌危险应限制在由所有其他原因引起的癌危险总和的0.1%以内。

规定危险标准的做法因国而异。以英国为例，它是根据事故后逗留在厂区边界的个人所受的剂量水平制定的。对于这样的人，建议将十万分之一每年作为刚刚可容

*1998年，INSAG制订的安全目标是将堆芯损坏频度(CDF)降到 10^{-4} 每堆年以下。它还称，在将来的核电机组中实施全部安全原则后CDF应能降至 10^{-5} 堆年以下，厂区外大规模释放的概率至少应比此值小10倍。这些推荐意见已增补到“IAEA安全基本原则”中，已在IAEA成员国的法规中有所反映。

各种能源链的事故危险比较



来源: 欧洲委员会ExtremE项目; 瑞士PSI的研究; IAEA。

注: 图中反映的是历史情况。职业性事故的数据是针对欧盟的。严重事故的数据是世界平均值。

主题。1996年的 Directive 囊括了长久以来一直作为核安全的标准组成部分处理的许多内容,如:将具有潜在危害的设施通知安全主管部门,编写安全报告和制订应急计划,设施修改问题,制订土地的使用规划或发生大事故后应提供的资料。

在大多数 OECD 国家,法规仍然是确定的而不是概率论性质的。申请兴建新的设施必须同时提交安全报告。该报告应指出有哪些危害,要列出降低事故概率和减轻事故后果的措施,并提供有关公众当局制订应急计划所需的资料。

在德国,申请许可证时必须同时提交安全分析。该报告应证明安全措施足以阻止可能引起灾害性事故的各种事件的后果。后果评估只要求考虑可信的后果,若能判明组织措施或技术措施足以防止最坏的情景成为事实,则可以不考虑这种情景。尽管评价安全分析报告的专家们有他们自己的准则,包括可能造成的损伤的规模事故的发生概率,但可接受危险这种概念尚未被正式认可。

在英国和荷兰,安全目标是用定量术语表示的,要求危险评估通过证明符合这些安全目标。在英国,安全分析报告是由卫生和安全部

许的危险率,将百万分之一每年作为普遍可接受的危险率。

从当今各国的法规看,一种明显的趋势是降低涉及堆芯损坏和放射性释放事故的频度。对于新的核电机组,放射性大量释放的可接受频度比已有核电机组的低得多,通常低于百万分之一。

又如,按照芬兰 1997 年生效的法规,为申请核电机组的许可证做准备的 PSA 分析必须证明大量释放的频度低于二百万分之一每堆

年。

非核能源

非核能电力生产系统的事故危险出现在各个不同的阶段。例如,煤的开采、石油或天然气贮存,或水坝的使用。大多数国家处理防范事故的方法是确定论的,认为只要按法规办事,电厂就是“安全的”。

仅有少数国家已把危险量化,并规定了数字安全目标。在欧盟,限制固定设施的重大工业危害是 1982 年和 1996 年 Seveso Directive 的



(HSE)利用容许危险(TOR)这一概念评价的。对于已有的大型工业设施来说,任何公众成员的最大 TOR 为 10^{-5} /年。对于制订大型有害设施附近的土地使用规划而言, 10^{-6} /年的危险是个下限值,低于此值的危险被认为是可以忽略不计的,高于 10^{-5} /年的危险被认为是不可容许的。这两个值之间的危险正是应该仔细研究的,目的是把这些危险减小到合理可行尽量低(ALARA)的水平。

按照英国的做法,个人遭遇到的其他危险相比确实是可以忽略不计的那个点,作为得到广泛接受的区域的下限。随着技术的进步,新的措施变得更加可行,ALARA 原则中所要求的判断会将容许的危险值降低以便与当时的知识和技术保持同步。因此,对于现役电厂来说认为是可接受的危险值,对于新电厂来说或许会变成不可接受的。

在荷兰,每个有害设施的运营者必须准备有关厂内外危害的安全报告。对已有的情况,个人的最大厂外容许危险为 10^{-5} 每年,对于新的情况则为 10^{-6} 每年。如果造成 10、100 和 1000 人死亡的事故的频度分别不超过 10^{-5} 每年, 10^{-7} 每年和 10^{-9} 每年,则这样的社会危险就

是可接受的。当然,也可能会有不符合本规则的情况,而且事实上当具体情况要求这样处理时就这些做了。例如,就鹿特丹港或斯希普霍尔机场周围地区而言,已接受的危险值就高于细则中规定的值。

评估事故危害

严重事故的比较分析可以以历史证据、PSA 或两者的组合为依据。

创建“与能源有关的严重事故数据库”(ENSAD)是瑞士 PSI 所做的大量工作的成果之一。该数据库不仅包括由能源相关系统中发生的严重事故所造成的死亡人数,而且包括受伤人数、被疏散人数、污染物释放量、受污染面积和经济损失等数据。按照 ENSAD 采用的定义,严重事故是指具有以下几种后果之一或多种的事件:至少 5 人死亡、至少 10 人受伤、至少 200 被疏散、释放 10 000 吨碳氢化合物、强制清理的土地或水域面积超过 25 km^2 ,以及经济损失超过 500 万美元。

总结世界不同地区的事事故危险并考虑技术方面的发展,导致将事故指标细为分这些因素的函数。就水电站而言,这种结果非常显著。不同类型大坝的指标表明,在 1930—1996 年期间西方国

家中故障率最低的水坝为重水坝(1.3×10^{-5} 每坝·年),最高的为填石坝(3.0×10^{-4} 每坝·年)。选择 1930 年为分界日期有以下几个原因。那时,在英美的几座水坝出事之后,有几个国家颁布了监督水坝安全的法律,同时工艺技术也发生变化,以更加牢固的混凝土代替传统泥瓦工做为基本的建筑材料,其结果是 1930 年以后建的水坝故障率大大降低。

除了设计方面以外,各国在质量保证、监测、安全文化以及安全主管部门是否尽职等方面的差异,也对这些结果产生影响。例如:在 1969—1996 年期间,全世界水坝的死亡指数表明其危险相对就高,死亡率达到约 0.9 人/吉瓦电·年。然而,如果把 OECD 和非 OECD 国家区分开来统计就会发现,非 OECD 国家此期间的此类死亡率为 2.2 人/吉瓦电·年,而 OECD 国家仅为 0.004 人/吉瓦电·年。这表明,笼统地把各种“水坝”的世界平均数据用来估算(例如,在挪威)将要新建的重力坝的安全性就是一种误导。与此不同的是用定量的危险分析来研究实际状况则是较理想的。

就核电而言,设计的不同对电厂安全水平起决定性的影响。历史数据表明,轻水

堆(LWR)和重水堆(HWR)核电厂中发生的事故从未造成早期死亡。

此类反应堆仅有的一次产生场外释放的事故,是1979年发生在美国哈里斯勃格的三里岛(TMI)事故,给周围居民带来的剂量极小。根据不同的资料估算出的集体剂量从0.5到50人·希不等。根据TMI事故总统委员会的估算,居民累积剂量的最可能值为5人·希。因此,TMI事故最可能死亡人数为零个,尽管相应的上限估计值为2。

1986年的切尔诺贝利事故发生在RBMK堆上,这是另外一种反应堆设计。在研究按照国际公认的核安全原则设计、建造和运行的核电厂中的事故危险时,这种设计不具代表性。然而,正是这一事故对公众意识的形成起了极大的作用。

RBMK堆的设计是从产钚的军用石墨慢化堆演变来的。这种堆与正在其他国家中运行的LWR完全不同,它的几个特点使这起事故成为可能并且注定要酿成这场悲剧。这些特点中最重要的一点是,当堆芯温度增加时反应堆功率有自动增加的趋势。

这种“正反馈”只有在某些条件下才是重要的,那起事故发生时那些条件恰恰全

都满足了。当时的反应堆功率,一直增加到超过100兆瓦,燃料都气化了。

而这种情景在LWR中是不可能发生的,因为在LWR中,温度的增加必然导致反应堆的反应性和功率下降。RBMK堆设计中有助于这起事故发生的其他特点也是此种堆型所独有的。

而且,核安全的许多基本原则在切尔诺贝利那里都未得到体现。

安全问题没有得到应有的充分重视,而是屈从于政治和生产目的;安全主管部门只起配角作用;操作员未受过应付事故的培训,而且不了解事故发生时所采取措施中隐藏着的危害;没有吸取本该可以从国际上学习到的反应堆安全方面的经验教训;在RBMK反应堆的安全事务方面也不可能开展国际合作。事实上,RBMK在该国以外是找不到的,也不可能颁发许可证的。

1989年,英国负责居民卫生和安全的主管部门得出结论,RBMK的设计和PWR的设计在安全特点方面存在根本的差异,以致前者的经验不能用于判断后者的安全问题。

此处提供的严重事故指标就是按照这一结论分别处理的。他们把切尔诺贝利事故的后果看作RBMK反应

堆所特有的,而用基于TMI事故的指标代表其他的所有类型反应堆。

总的来说,非核能系统登记在册的严重事故为数不少,因而能够画出预期的事故频度和严重程度的曲线。然而,有关核事故的数据匮乏(在所发生的事故中,除TMI和切尔诺贝利这两起外,其余的几乎没有什么放射学后果),使得有必要在实践中利用从PSA研究中获得的数据。

PSA研究主要用来评价核电厂的设计和程序是否完整,并指出其薄弱之处,以致能非常有效地找到改进的方向。有几个国家也利用它们来显示核电厂遵守安全法规的情况。因此,PSA研究已成了安全评估方面的有用的工具。

在非核工业领域,人们一直在使用一种类似的定性评估危险的做法,如估算在康韦岛贮存液体燃料的危险。结果清楚地表明,非核设施的危险高于压水堆核电厂的危险。

事故数据的比较

基于历史事实的结果表明,各种能源系统的、合计后归一化的损伤率差别很大。OECD国家严重事故导致的立即死亡率,最高的是液化石油气,然后是石油、煤、天

严重事故所造成的损伤的指标

历史上非核能源系统发生严重事故后引起的早期死亡人数已统计出来。核能系统的早期死亡人数(仅仅是切尔诺贝利事故引起的)及潜性癌症死亡人数都已估算出来。鉴于缺乏受到与切尔诺贝利事故所造成辐射剂量相近似的辐射剂量照射的大居民群体的负面健康影响实际观测值,因此,在前苏联领土上相应的潜性死亡人数是根据保守的假设估算出来的。预计将来实际观测到的死亡人数应该大大低于此数。

损伤指标 (每吉瓦电·年)	煤 OECD	石油 OECD	天然气 OECD	液化石油气 OECD	水电 OECD/非 OECD	核电 LWR/RBMK
立即死亡人数	0.13	0.39	0.066	1.8	0.004/2.19	0.0/0.16
潜性死亡人数	?	?	?	?	?	0.0005/46.5
受伤人数	0.019	0.44	0.22	7.34	0.23/0.143	0/2.15
被疏散人数	0	7.41	4.83	481	10.1/70	33/726
经济损失(1996 年美元)	0.035	0.94	0.11	1.92	0.7/0.5	1.3/1760

注:人们通常不追查非核事故所造成的潜性死亡人数,尽管该数字可能是有意义的。就核电机组而言,表中 RBMK 和 LWR 的数据是指历史事故所引起的最大死亡人数预计值除以这些反应堆类型所生产的能量。

来源:1969—1996 年期间欧洲 OECD 国家和非 OECD 国家,非核能系统的数据来自瑞士 PSI;1960—1998 年的核电数据来自 IAEA。

然气、水电和核电。PSI 的研究表明,研究过的所有能源系统事故的各种损伤率,非 OECD 国家明显高于 OECD 国家。

鉴于基于历史的和预测性的方法有各自的优点和局限性,因此对于比较事故风险来说,更有用。在这种方案中,非核系统的数据(一个非常复杂的严重事故统计数据库)以历史事实为基础,表中显示的核电数据则以 PSA 的结果为基础,以历史数据

做为附加的参考点。对于西方类型的反应堆,公众的危险一般为 0.01—0.1 缓发死亡人数每吉瓦电·年。对于正在运行的西方类型反应堆,有代表性的个人危险估算值约为 10^{-9} 每吉瓦电·年,对于即将出现的渐进型核电机组设计此值更低。由于造成死亡的不仅是严重事故,而且还有发生频度更高的、普通的小事故,因此,在 ExternE 研究项目中的职业性事故数据(对 OECD 国家

来说是有代表性的)对于评议危险是有用的。这些数据表明,职业性事故危险最高的是煤和石油,核工业中的此类危险只有煤和石油几分之一。

尽管按国际认可的核安全原则建设并运行的核电厂保持着良好的安全记录,但还需要不断努力。切尔诺贝利事故的严重性时时刻刻在提醒我们,所有的核电厂都必须保持高的安全标准。□