

不同能源系统的事故危险比较： 俄罗斯专家的意见

俄罗斯联邦原子能部收到了一些关于《IAEA 通报》1999 年第 41 卷第 1 期中的一篇题为“不同能源系统的事故危险比较：多大的危险是可以接受的？”的文章的意见。这些意见分别来自俄罗斯科学院通讯院士、俄罗斯科学院核动力安全研究所所长 L. A. Bol'shov, 动力工程研究与开发研究所所长 B. A. Gabaraev, 俄罗斯联邦医学科学院院士、国家研究中心生物物理研究所所长 L. A. Il'in 和俄罗斯联邦医学科学院院士、俄罗斯辐射防护科学委员会主席和俄罗斯联邦医学科学院医学研究中心主任 A. F. Tsyb. 俄罗斯原子能部长以“致编者的信”的名义将其转交给《IAEA 通报》编辑部。以下转载这些意见并提供所有参考文献目录。

这篇《IAEA 通报》文章的作者——原 IAEA 核设施安全处职员、现波兰原子能研究所核安全委员会主席 Andrzej Strupczewski 和瑞士 Paul Scherrer 研究所系统/安全分析部主任 Stefan Hirschberg 对这些意见做出了答复(见第 31 页)。

许多有关不同能源系统与核能相比的事故危险分析的文章,都有某些老一套的特点。例如:

- 当评价与这类设施运行有关的危险时,这些文章忽视 RBMK 堆在切尔诺贝利事故后所做改进的效果。

- 在全面评价切尔诺贝利事故放射学后果时,它们使用大量常常带有不可靠来源数据和无事实根据的预测的研究报告,而且它们忽视许多大大增加事故损害的社会政治因素。

遗憾的是,尽管所论的这篇文章切中时下关注的问题并在研究方法上有独创性,但它也不是没有这种缺点。

RBMK 堆的改进 切尔诺贝利事故发生后, RBMK 堆核电厂曾采取史无前例的改建和加强安全的措施,而且至今仍在继续采取这些措施。根据在国际专家协助下进行的概率安全评估(PSA)[1,2],由于采取了上述措施,RBMK 堆的严重事故概率减小一半或更多。

所有运行中的 RBMK 堆的平均加权安全指数为

10^{-4} /年,并且由于正在和计划对所有机组的改建,这个指数还在减小。因此,所有运行中的 RBMK 堆核电厂的安全性都是与成功运行的前苏联水-水堆(WWER)和西方沸水堆(BWR)及压水堆(PWR)相当的,并且都符合 IAEA 关于较老一代核动力堆危险水平的建议。

切尔诺贝利事故的放射学后果 这篇《IAEA 通报》文章的作者给出切尔诺贝利事故的远期放射学后果估计值:辐射诱发癌的死亡例约在 10,000—30,000 之间,关于这一专题的文献含有甚至更过分的估计值。然而,我们对居民以及清理人员进行的 14 年剂量监测和医学监测经验使我们对上述估计值多少持批判态度。

所有这类估计值都是以剂量—效应关系由高剂量到低剂量的线性外推得来的线性无阈值模型为基础的。这种方法的正确性是很值得怀疑的。所有可供使用的数据(来自对数万名不同国家核领域各行业工作人员和日本原子弹爆炸受害者的广泛监测)表明,在低于 0.1 希的

短时间全身照射水平下恶性肿瘤发病率没有增加。如果我们考虑慢性照射条件下照射效应的衰减,可将这种照射水平定为 0.2—0.5 希。目前还没有证据表明,在低于此实际阈值情况下肿瘤和遗传学上的损害发生率会有可测量的超出[3]。

如果我们接受这个阈值,那么在评价低剂量和超低剂量对大的人群的随机效应的危险时,集体剂量这个概念实际上便可忽略不计[3]。

考虑到公众和切尔诺贝利事故清理人员接受的照射剂量的具体特点,以及由此而产生的用来预测和评估放射学后果的那些方法中的差异,这些问题需要单独来研究。

对公众的放射学后果

在事故发生后的最初几年中,对公众的放射学后果在全剂量范围进行过评估,接受评估的包括污染最严重的地区(所谓严格控制区)的 27 万人,9 个污染区的 1560 万人以及前苏联(USSR)欧洲部分的 7490 万人[4]。在这份评估报告中,采用了 1988 年得出的一些相当保守的照射剂量估计值。评估结果表明,除与甲状腺照射有关的效应外,可归因于高于自然本底的辐射诱发肿瘤死亡率没有可觉察的增加。因此,为考虑所采取的防护

措施的实际有效性,把公众接受的照射剂量的估计值往下进行了修正。人们已经实际接受的外照射剂量和内照射剂量,开始在终身剂量中起愈来愈大的作用。同时,为额外的死亡危险而引入的一些更高系数开始被用于评估(国际放射防护委员会第 60 号出版物)中。在 20 世纪 90 年代,生活在 37 千贝可/米²(1 居里/千米²)等污染密度线内的前苏联 720 万人的集体剂量,被估计为 70000 人·希,而且计算所得的使用线性无阈值假设预测的致命癌的假定病例数约为 3500。这个数字是这部分人中 100 万预期自发致命癌病例的 0.35%[5]。

根据切尔诺贝利事故发生后 13 年中所得出的最新评估结果,有效剂量只是在白俄罗斯、俄罗斯和乌克兰的那些受污染最严重的地区(那里的铯-137 土壤污染密度高于 555 千贝可/米²(15 居里/千米²)),与同一时期来自天然来源和医学来源的总的累积剂量(大于 50 毫希)不相上下。累积剂量高于 50 毫希的居民总数约为 10 万。考虑到大部分的内剂量和外剂量已被接受,这部分人的集体终身剂量将不超过 7000 人·希。如果我们假定致命辐射诱发癌风险的终身系数为 5×10^{-2} /希,则预期的辐射诱发致命癌的假定数

会是 350 例。必须记住,这个评估结果与公众接受的个人照射剂量有关,而这些个人照射剂量比为可靠鉴定遥远效应确定的实际阈值低 3 到 5 倍。

上述前苏联的 720 万居民的绝大部分生活在铯土壤污染水平为 30—70 千贝可/米²的地区。这些人的累积照射剂量和预测照射剂量的范围从几分之一到几毫希,等于天然本底辐射和医学程序造成的总的照射剂量(4 毫希/年,其中 2.8 毫希来自天然源,1.2 毫希来自医学实践)的一小部分。鉴于上述情况,把这一组包括到集体剂量和风险评估计算中将是不适当的。

正如所预测的那样,切尔诺贝利事故发生后的几年中,在已经接受对甲状腺的最高照射剂量的那些居民组即儿童和青年人当中,甲状腺疾病病例数大幅(9 倍)增加,例如在俄罗斯的勃良斯克地区,2000 年初共有 109 个在事故发生时是儿童的人患上甲状腺癌,其中 1 人已死去[6]。根据俄罗斯国家医学剂量测定登记处(RNMDR)的预测,在事故发生时是儿童和青年的人群中,到 2006 年,可预计有 360 人患上甲状腺癌。已确定辐射因素在诱发甲状腺癌中的作用。对于俄罗斯,只就事故发生时是儿童的并且生活在勃

良斯克地区的人确定了辐射因素的作用:1/3 的甲状腺癌是由辐射照射引起的,而增加的甲状腺癌病例中至少 66% 可归因于筛选效应。应该指出,随着收集更多统计资料,辐射所起作用的估计值正在减小:在一些较早的出版物中,所发现的甲状腺癌中的 85% 被归因于辐射 [7]。

事实上,切尔诺贝利事故发生后的所有这年中,俄罗斯受污染地区居民的总死亡率和癌死亡率,一直没有明显的反常增加。在勃良斯克地区——俄罗斯受污染最严重地区——的居民中,由包括白血病在内的恶性肿瘤引起的死亡风险,在事故发生以前和以后,在统计结果上与整个俄罗斯的数字没有明显差异。俄罗斯污染地区成年居民中的恶性肿瘤发病率正在稳步增加,这和俄罗斯其他地区的情况一样。不过,事故发生以前和以后的比较,以及与其他地区的比较,都表明切尔诺贝利因素对这种增加没有任何影响 [8]。

对清理人员的放射学后果 对清理人员中癌发病率和死亡率增加的种种预测差别,基本上源于对事故后不同年份清理人员数目的不同估计和剂量负担在这些人的分布。

现在,白俄罗斯、俄罗斯

和乌克兰中约 60 万人有清理人员证书。事实上,在照射剂量也许对遥远效应预测有意义的那些年里,参与 30 千米地区清理作业的人员几乎不到 20 万。1986—1987 年清理人员中只有一部分接受了高于 100 毫希的剂量,这样的人员总共不到 25 万。根据 RNMDR 提供的相当保守估计值,这 3 个国家的总的情况是,这 25 万清理人员中预期由辐射诱发癌造成的额外死亡约为 1000 例 [7]。必须注意,所有类似估计都使用护照剂量数据,即每个清理工作人员的经正式证明的外照射剂量值。一些仪器方法和正式程序被用于测定这些数据。

对清理人员接受的平均个人和集体照射剂量还有着更详细的评估 [9—11]。在这些评估中,考虑了在清理作业所涉各单位和部门中组织剂量监测的方式。根据研究 [11], 11.7 万清理人员的 1986 年平均剂量为 0.083 戈瑞,集体剂量为 9888 人·戈瑞。1987 年,这两个数字分别为 0.047 戈瑞和 5100 人·戈瑞。因此,清理人员在 1986—1987 年接受的集体辐照剂量 (14900 人·戈瑞) 也许引起约 600 额外致命癌病例,如果我们使用一种线性假设的话。

因此,可以预测,切尔诺贝利事故于 1986—1987 年

在所有这 3 个国家清理人员中引起的致命癌病例总数为 600—1000 例。

在切尔诺贝利事故发生后的这年里,我们能够更多地依赖这些清理人员的医学监测结果。从 1986 年到 1989 年,共有 18 万俄罗斯清理人员通过 RNMDR 得到监测。事实表明,清理人员中总死亡率在事故后的所有这年中,在统计上都低于这个国家对照组的死亡率。这一点可以部分地归因于“健康工作人员效应”、较好的医疗等。没有发现剂量与死亡间有任何关系。

我们曾预测总的额外癌死亡率比自发水平高 3%—4% [3,7]。于是,我们可以只在少见类型恶性肿瘤 (白血病和甲状腺癌) 场合下,而且只在根据特别是所论效应与对照组间的适当比较进行仔细流行病学研究后,谈论与切尔诺贝利事故相关的增加的统计学上可靠证据。

事实证明了这一点。与自发水平相比,癌发病率与死亡率统计学上没有任何显著的增加。

在俄罗斯清理人员中白血病死亡率的增加方面,统计学上存在可靠的证据。根据 RNMDR 数据,参与 1986—1987 年作业的俄罗斯清理人员查出白血病 48 例,而且 2 例中有 1 例被认为是辐射诱发的。这里应该

强调,辐射诱发白血病的峰期发生在事故后4—5年内[10]。

因此,采用一种线性无阈值方法,便可求得公众与清理人员中致命癌的假定病例总数为1000—4500。这低于作者在所涉文章中给出的最低估计值(10000—30000例)。所以,为RBMK反应堆确定的事故危险(以死亡/吉瓦电·年表示,见《IAEA通报》第41卷第1期第27页)的范围也将是不同的。适用

为危险评估提出的实际阈值(急性照射为0.1希,慢性照射为0.2—0.5希)将使这些数值降到1/10—1/100。

除在确定这种低危险的社会意义时遇到方法学上的复杂性外,还必须考虑下面因素。所论人群还面临许多别的危险,包括多种辐射危险。这些危险中有许多是能够被显著降低的。这些因素包括与医学程序相关的危险、房屋中的氡气、环境中的

化学污染,食品的质量、生活标准和医疗。 □

联系信息:

B. Gabaraev 先生, Research and Development Institute of Power Engineering, P. O. Box 788, Moscow, 101000, Russian Federation. 传真: + (095) 9752019. 电子信箱: tam-gonti@entek.ru
俄罗斯原子能部地址: ul. Bol'shaya Ordynka, 24/26, Moscow, 109107, Russian Federation.

参考文献:

1. Barselina Project, Phase 3, Summary Report, Ignalina Unit 2, Probabilistic Safety Analysis (June 1994).
2. Probabilistic and Deterministic Safety Analysis of Unit 2 of the Leningrad Nuclear Power Plant, Summary Report, LPR 150 (January 1999). In Russian.
3. Il'in, L. A., Radiobiology and Radiation Medicine — Problems and Prospects of Interaction Within the Context of Regulatory Activities Relating to Ionizing Radiation, Med., radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'1 (1998), 8-17. In Russian.
4. Il'in, L. A., et. al., Radiocontamination Patterns and Possible Health Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant, J. Radiol. Prot. 10, 1(1990), 3-29.
5. Il'in L. A., Radiation Impact Regulations, Radiation Burden on the Public and Medical Effects of the Chernobyl Accident, Med., radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'12 (1991), 9-18. In Russian.
6. Ivanov, V. K., Gorsky, A. I., Tsyb, A. F., Maksuytov, M. A., and Rastopchin, E. M., Dynamics of Thyroid Cancer Incidence in Russia Following the Chernobyl Accident, J. Radiol. Prot. 19, 4(1999), 305-318.
7. Tsyb, A. F., Medical Effects of the Chernobyl Accident, Med., radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost, 1(1998), 18-23. In Russian.
8. Linge, I. I., Melikhova, E. M., Gubanov, V. A., Mortality Rates in Russia and Nuclear Power as a Risk Factor, Izvestiya Akademii Nauk: Ehnergetika 1 (1999), 100-120. In Russian.
9. Retrospective Dosimetry of Clean-up Staff Involved in the Chernobyl Accident, SEDASTIL, Kiev (1996), 234. In Russian.
10. Tsyb, A. F., Ivanov, V. K., Evaluation of the Medical Effects of the Chernobyl Disaster Based on RNMDR Data, International Journal of Radiation Medicine 1 (1999), 39-48. In Russian.
11. Il'in, L. A., Kryuchkov, V. P., Osanov, D. P., Pavlov, D. A., Exposure of the Chernobyl Accident Clean-up Staff from 1986 to 1987 and Verification of Dosimetric Data, Radiatsionnaya biologiyai radioehkologiya, 35, 6(1995), 803-82. In Russian.

作者回应俄罗斯专家意见

我们感谢俄罗斯专家就我们文章发表的意见。我们承认降低 RBMK 风险工作中取得的进展,并欢迎对切尔诺贝利事故放射学后果提出的新结论。不过,我们声明,我们的文章是正确的。具体地说,

- 我们注意到对我们用于比较评估的系统方法有一种误解;

- 我们对关于所有运行中的 RBMK 型堆的安全性“与西方的 BWR 和 PWR 相当”的说法表示怀疑;

- 我们强调,我们的报告与俄罗斯的放射学后果评估报告之间的差异,是因为在评估低辐射剂量的健康后果时使用了不同的假设。

关于我们分析的细节,我们可以查看由瑞士的 Paul Scherrer 研究所 (PSI) 进行的原始研究[1]。

研究方法 PSI 比较研究主要基于对 1969—1996 年期间事故经验的评价。由于 PSI 研究(和我们的报告)不试图评价 RBMK 安全性的最新水平,并且在任何场合都限于 1969—1996 年时间框架,所以评价中未考虑 RBMK 已经取得的那些值得注意的安全改进。这项研

究对化石系统和水力的实绩评估也采用同样原则,即并未特别考虑可能已实施的最新安全改进。对于西方核反应堆,这项研究使用了 3 级概率安全评估 (PSA),因为这些堆很幸运确实未发生过涉及死亡的严重事故。之所以使用这种 PSA,是因为与切尔诺贝利事故和 RBMK 堆相比,西方核反应堆在相关设计和运行环境上存在一些根本差异。PSI 研究完成时,还没有可供 RBMK 使用的 3 级 PSA,并且据我们所知,目前也没有。否则,其结果将毫无疑问地被考虑进来。

RBMK 安全 RBMK 的堆芯损坏频率已经从最初的高水平大幅降低。这一进展是大家所欢迎的,也是所需要的。近来为 RBMK 而进行的少量 PSA,在识别设计和运行弱点以及确立优先改进部分方面提供了有用信息。不过,这些 PSA 的使用仍然有限,不但在与可能事故的起始事件(重要的外部事件未被充分讨论)有关的范围上如此,同时也因为它们不考虑反应堆运行的低功率和关闭状态。此外,伊格纳林纳和列宁格勒核电厂之

间,在估计堆芯损坏频率和安全改进实际执行程度两方面存在大的差异。

尽管 RBMK 尤其是第三代堆的事故定位系统已经得到进一步改进,但是 RBMK 堆仍然没有像 LWR 那样的完全安全壳。这使我们可对堆芯损坏情况下放射性大量释放的可能性作种种相应推断。RBMK 也没有装备完全独立的第二停堆系统。因此我们认为,RBMK “与西方的 BWR 和 PWR 安全性相当”的笼统说法至少是有问题的。

切尔诺贝利事故的放射学后果 我们估计有潜伏致命癌症 9000 到 33000 例,主要依据是 EC/IAEA/WHO 评价报告[2]和联合国原子辐射效应科学委员会 (UNSCEAR) 的结论[3]。我们的工作得到覆盖约 140 份参考资料(包括俄罗斯作者的大量论文)的文献评述的进一步支持。在我们的文章中,我们曾强调上述估计值是保守的。

根据俄罗斯专家的说法,他们的估计值为 1000 到 4500 例,即比我们的低一个数量级。俄罗斯专家指出,没有观测到缓发癌症的增加,清理工作人员的死亡率低于一般人口。这些来自俄罗斯辐射医学主管部门的说法是

很重要的。这些专家还强调，总体上没有证据证明急性照射情况下剂量低于 0.1Sv 时和慢性照射情况下剂量低于 0.2Sv 时，肿瘤或遗传损害有可测量的增加。

我们同意这些说法，并支持剂量计算引入“实践阈值”将大大降低估计的事故潜在健康效应的结论。不过，我们论文中给出的评价建立在线性非阈值(LNT)假设的基础之上。这种假设虽然具有保守性，却是国际放射防护委员会(ICRP)等主管组织推荐的基础。

俄罗斯专家在所提供的上下限的估计中，没有使用 LNT 假设。俄罗斯专家使用的方法没有考虑对低于 50mSv 的个人照射的贡献。这种疏忽意味着，他们没有考虑下述人群中的潜在健康效应：被疏散者；严格管制区的一部分人口；前苏联 680 万生活在受污染区的居民；1988—1990 年间的应急工作人员；和事故后受到微小辐射剂量的整个北半球人口。

参考文献：

1. Hirschberg S., Spiekerman G., 和 Dones R., “Severe Accidents in the Energy Sector”, PSI Report Nr. 98-16, Villigen, Switzerland (1998).
2. “Background Papers 1-8” of the EC/IAEA/WHO International Conference: “One Decade after Chernobyl—Summing up the Consequences of the Accident”, Vienna, 8-12 April 1996, IAEA Proceedings Series, Vienna (1996).
3. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR), “1993 Report to the General Assembly, with scientific annexes”, United Nations sales publication E. 94. IX. 2, New York (1993).

在 EC/IAEA/WHO 评价的潜伏致命癌症的上估计值中，总估计值 33000 例中的 23000 例源于北半球人群。这份 PSI 研究报告指出，在每年 50mSv 的个人剂量或 0.1Sv 的寿命剂量的阈值假设下，估计的死亡数将大大降低。

因此，EC/IAEA/WHO 评价和俄罗斯专家提出的说法之间的主要差异，并非从照射剂量的不同估计值而来。相反，这些差异来自所用的评价方法——俄罗斯专家不考虑那些可与寿期内由于医疗实践或者高本底辐射照射受到的剂量相比较的辐射剂量，而 EC/IAEA/WHO 评价和 PSI 研究的确考虑了它们。俄罗斯的以阈值假设为基础的方法，也许是正确的，我们个人认为使用这一方法提供最好的估计值是合理的。

不过，我们发表在《IAEA 通报》的报告是以 EC/IAEA/WHO 评价为基础的。报告采用 LNT 假设，并提供了与能源体系比较研究

中一般假设相一致的潜在致命癌症保守上限。

总之，我们认为俄罗斯专家的反应不是对我们论文及其总结论的挑战，而是一个就 LNT 方法的理论基础进行更多专业对话的机遇。这个问题远远超出对可能归因于切尔诺贝利事故的潜在死亡数的估计，并且影响有关核动力未来的辩论。

联络信息：

Stefan Hirschberg, Paul Scherrer Institute, CH-5232 Villigen PSI, Switzerland. 电子信箱: Stefan.hirschberg@psi.ch

Andrzej Strupczewski, Institute of Atomic Energy, Poland, 05400 Otwock-Swierk, Poland. 电子信箱: A.Strupczewski@cyf.gov.pl

使用因特网的读者，可在机构 WorldAtom Web 网站 www.iaea.org 《IAEA 通报》网页看到作者关于比较风险分析的文章。见该网站“Periodicals”栏目。本文具体网址是 www.iaea.org/worldatom/Periodicals/Bulletin/Bull411/index.html。