

各种能源的相对健康风险和相对环境风险

赫尔辛基会议上发表的一篇主题论文的结论

S. Haddad
和 R. Dones

首次着手比较各种发电系统对环境健康的影响,是70年代的事。当时就必须满足正在迅速增长的电力需求的最佳办法作出带有方向性的决定。这一代比较研究的倡导者,主要是受人们希望将当时可供利用的各种方案对公众整体的不利影响按一维风险尺度排序这一思想的推动。

最初的研究处理的是孤立的或单个的设施,因为人们当时的主要心事是对与电站为邻感到不安。随着有关的方法学的发展,比较研究的范围不断扩大。有一点很快就变得很明显,即若要公正地比较各种发电方案,就应全面考虑各能源系统的整个循环。

比较研究的第二步是把设施的建造和拆除阶段也包括在内。事实上,分析表明,对许多设施来说,这两个阶段的风险是最重要的。

把建造阶段包括在内的这种转变,为进行更广泛的比较开辟了道路,例如对与制造必要设备所需材料的生产有关的效应进行比较。在这样一种比较宽阔的视野内,

Haddad 先生和 Dones 先生是国际原子能机构(IAEA)核安全处工作人员。本文取材于以联合王国 M. J. Chadwick 先生为首的一个国际专家小组为1991年5月在赫尔辛基召开的国际电力与环境高级专家学术会议编写的一篇主题论文(3号)。论文全文载于 IAEA 即将出版的该学术会议的论文汇编中。

对健康影响和环境影响的比较将重新回归到投资总额或就业总额之类的宏观经济总额上去,并将接近“技术评估”的概念。对于第二代比较研究来说,主要变化在于把重点放在相对风险评价过程的决策部分。

人们普遍认为,给各种发电系统排序的目的是要了解这些能源系统各自的优点。目前,人们的兴趣已转向把健康效应和环境效应纳入包括由各种能量来源组成的可供选择的各种电力生产方案中,并在当地、地区或国家一级根据具体的社会经济状况比较这些方案。

应当指出,迄今为止所做的涉及各种能源的环境影响的比较研究,要比涉及健康影响的少得多。

健康风险的比较

英国卫生和安全执行委员会(HSE)曾对早期的相对风险评价研究进行了严格而广泛的调查。HSE的这次调查(1980年)特别指出了把各种风险尺度归并成一个指标的做法有许多不足之处,并指出了定量表示或许不适宜量化的某些风险必然会带来不确定性;尤其是定量表示剂量-效应关系(包括接触化学品的延迟效应和长期效应)时的不确定性。

HSE的调查报告指出,人们对非核风险的了解往往比对相应核风险的了解少得多,报告要求对下列问题有更多的了解:

a)限制所谓的慢性硫效应用的较高和较低限值的含义；b)非核废物的长期效应；c)与某些非核工厂有关的潜在恶性事故；和d)某一系统的平均风险和与边际变动有关的风险之间的区别。

A. F. Fritzsche 在 1989 年所做的研究，是对各种能源的相对风险评估工作的最新和最全面的评议之一。风险数据是从经过严格审查的各国风险文献中广泛地搜集来的。这项研究所得出的结果细心地按不同的风险尺度分类，特别是与正常工况和事故工况有关的风险尺度。这些结果被认为当前欧洲有可能要建造的大型现代化电站的典型结果。(见右图。)

尽管可以从健康风险角度将各种能源系统排序，但由于厂址和工艺技术方面的差异，观察和解释这些风险的绝对值时必须小心谨慎，也就是说它们只具有相对的意义。

考虑到解释这些结果时的上述种种限制，关于健康风险影响问题，可以根据 Fritzsche 的研究结果(不包括恶性事故)作出如下的具有相对意义的说明：

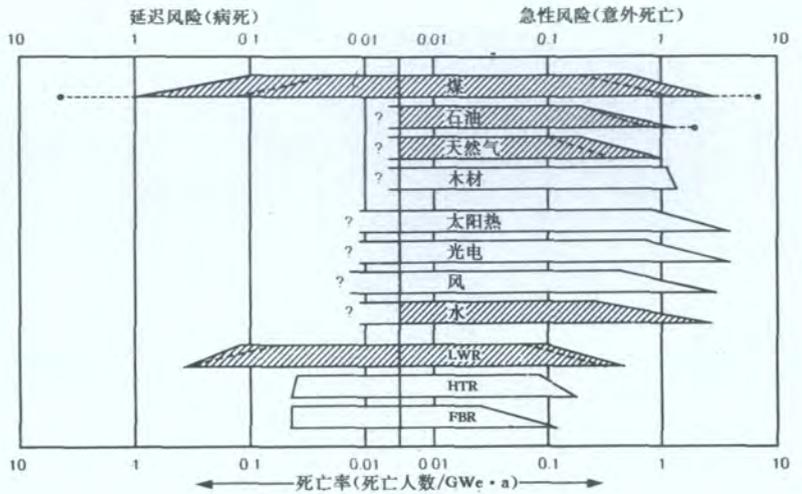
●**即时职业风险。**就煤炭循环而言，其职业风险明显地高于石油和天然气；与可再生能源系统风险的数量级相同，是轻水堆(LWR)相应风险的 8—10 倍。可再生的太阳能和风能方面未来的技术进步，或许会大大缩小这些系统的即时职业风险(最多缩减到四分之一)。就即时职业风险而言，水力发电仍然是风险较大的一种发电方案。

●**延迟职业风险。**延迟死亡事件主要是由开采煤矿和铀矿引起的，两者数量级相同。然而，按归一化单位发电量统计，开采地下煤矿看来比开采地下铀矿更危险。

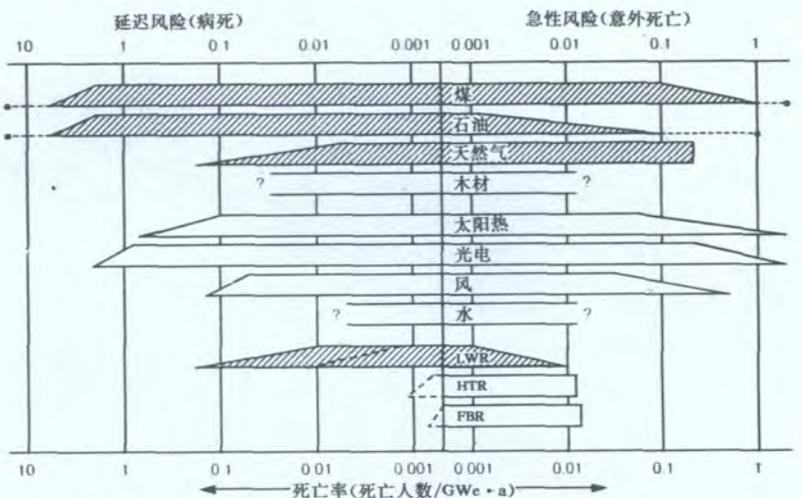
●**即时公众风险。**这些风险大部分是由运输事故引起的，与运输距离和运输方式关系极大。核电方案的风险只有其他的所有发电方案的十到百分之一，这主要是因为每单位发电量必须运输的材料数量较少。基于同样的理由，煤炭循环的即时

电力生产引起的死亡风险

职业死亡风险



公众死亡风险



注：这些估计数考虑了燃料循环的每个环节，但未考虑恶性事故。

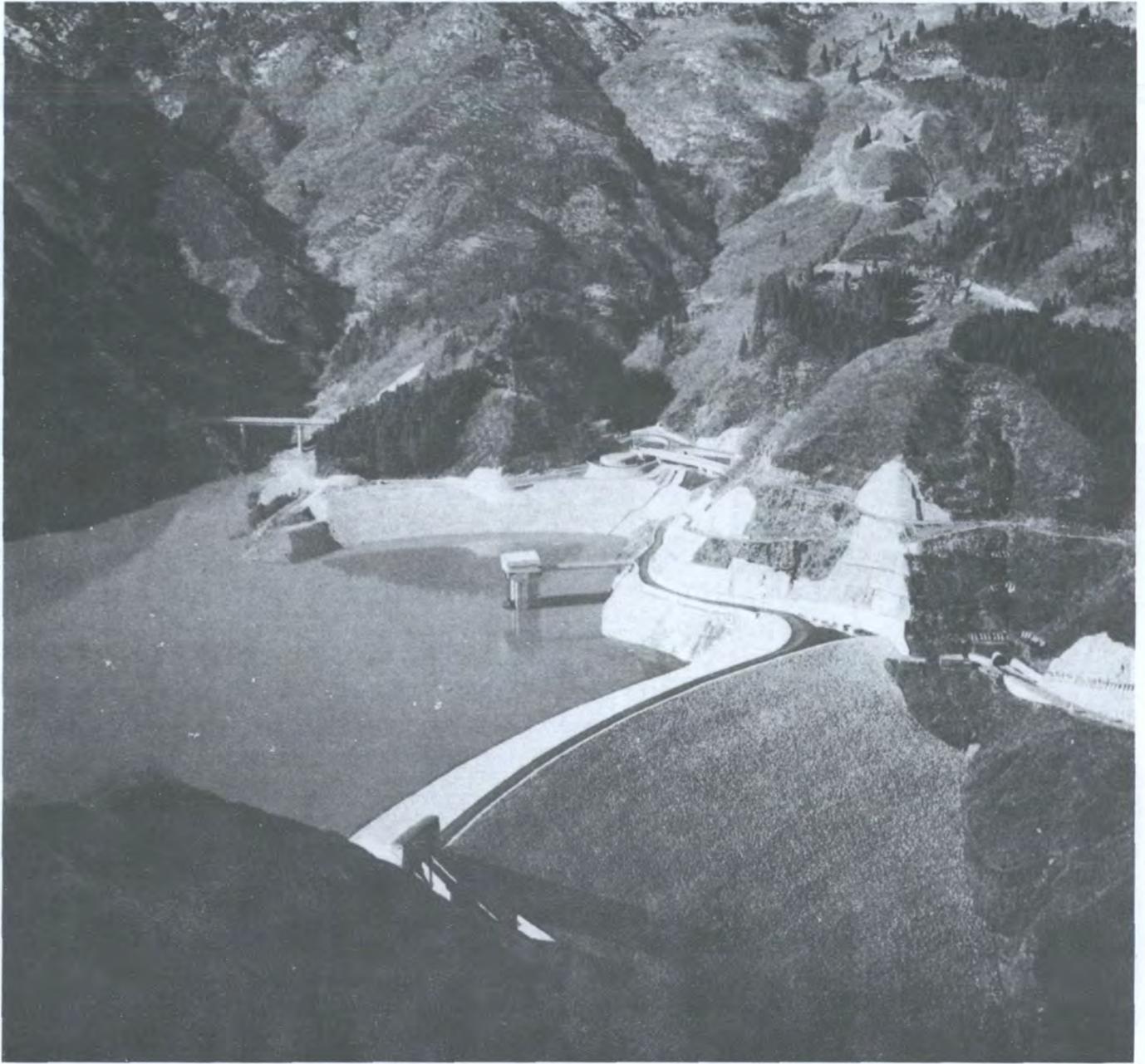
LWR=轻水堆；HTR=高温堆；FBR=快中子增殖堆。

来源：素材取自 A. F. Fritzsche, "The Health Risks of Energy Production", Risk Analysis 9, No. 4 (1989)。

公众风险最大，这是因为大量材料需要运输。

●**延迟公众风险。**关于各种能量来源产生的延迟公众风险，其估算值有很大的不确定性。因此，解释这些数值时应该十分小心。这些结果表明，核和天然气的延迟公众风险的数量级相同，最多只有煤和石油的这种风险的十分之一。还应该指出，某几种可再生能源的延迟公众风险也

这些图反映的是不同的数据来源和不同的装置、工艺与事故频度所引起的差别：带斜线部分是有充分根据的风险数据；无斜线部分是有疑问的数据。两端的斜坡表示风险数据的变化范围。



在日本,核能和水力是电力的两大来源。上图是手取川第一水电站。(来源:JAERI)

比较大,尽管预计未来的发展会使这类风险大大减小。

环境风险的比较

对于环境效应,无法像对健康效应那样按燃料循环进行比较。可作为研究对象的生物体数量众多,各个特定生态系统(并非个别生物体、群落或物种)事实上都是一些相关的单元,并需要区别不同物质对各

个生态系统的功能与结构的效应究竟是哪些。这些都意味着直接作数字比较也许实际上是不可能的。迄今,还没有能用作有效地进行比较的数值尺度的、公认的功能特性或结构特性。正是由于这个缘故,人们提出了其他一些进行比较的方法。

●用排序法评估。用这种方法可以显示出大致的比较结果。这时并不打算全面地衡量效应的大小;相反,用真值表的形式定性地表示不同燃料循环的各个阶段产生

的各种干扰所引起的环境影响。在某种程度上,这是这种表示法的宝贵优点,因为它把单个数字中的差别暴露了出来而不是隐藏起来。

●**排放量和环境质量指标。**废气和废液排放量可以用来评估各种燃料和工艺的潜在影响。(见右图。)这些排放物的总和能突出某些有意义的结果,包括:以单位能量排放的废物质量计,化石燃料能源组(煤、石油和天然气)的任一种能源的气载排放物总量几乎完全相等;与其他能源(煤除外)相比,天然气燃料循环的SO₂排放量(大部分是开采阶段排放的,而煤的大部分SO₂是在转换阶段排放的)相对说来较大。就用于发电的化石燃料组的整个燃料循环来说,每年每吉瓦电(GWe/a)的CO₂总排放量大约比任何其他能源燃料循环的相应值高两个数量级。在化石燃料组中,燃煤发电循环1 GWe/a(就整个燃料循环而言)的CO₂总排放量大约为燃石油或天然气发电循环相应值的2倍。

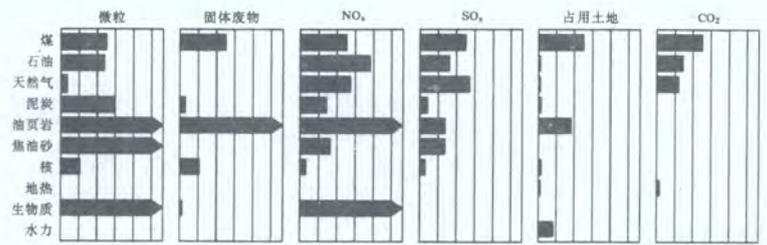
●**临界荷载和目标荷载法。**这种方法首先给某个地区中的各个区域指定一些临界荷载或目标荷载(或水平)值,然后与污染物的实际淀积量(或浓度)比较。例如,可以用淀积量超过临界(或目标)荷载的多少作为定量地衡量影响或效应的尺度。这种方法或许会进一步加以发展。减少排放量的各种策略(例如,把所有可行的工艺都用在发电厂上),其效果可根据超过量(和总的减少量及相应的费用)的变化加以比较。然后可将此与采取了(或未采取)其他策略后的超过量变化进行比较。(见下页表。)

●**环境影响的综合比较。**缺少对发电能源系统内各种燃料循环的环境影响进行比较的成熟方法,并不意味着不能进行有意义的比较。而且,随着数据的积累,总是会出现可靠方法的。随着临界荷载超过量评估方法的发展,以及逐渐弄清这些超过量的剂量—响应关系,就能使这一过程朝着定量比较的方向前进。

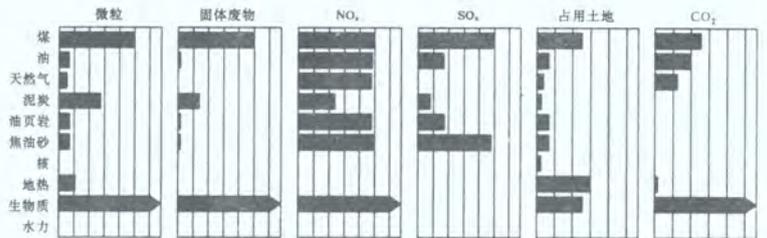
目前,可利用各种排放量或排放量的复合指标做定性比较。从化石燃料的使用

废气和废液排放量的比较

各种燃料源产生的排放量和残余物



能量转换阶段的废物排放量



注: 这两个图没有按绝对值绘。泥炭、油页岩和焦油砂的CO₂排放量没有估算。按质量计,核转换循环产生的固体废物比煤转换循环的低3至4个数量级。
来源: 素材取自“*The Environmental Impacts of Production and Use of Energy*”, Part IV, United Nations Environment Programme, Rep. ERS-14-85, Nairobi (1985)。

直到太阳能工艺以及核能的使用,释入大气的排放量差别很明显。与此类似,同一类燃料的不同燃料之间的差别也相当明显。

同样,可以利用超过量对各种环境影响进行排序,而且在全面尝试这样做了的地方,各种工艺产生环境影响的主要因素就比较清楚。例如,使用化石燃料由于排放大量CO₂,对全球的潜在影响就比其他工艺明显,对大气的地区性潜在影响也是如此。这种表述方式就可以使规划人员把注意力集中在这些主要方面。

这些图对发电用的各种燃料的废物排放量作了比较。有关废气排放量的数据取自联合国环境规划署完成的一项综合性的环境比较研究的结果。

恶性事故的风险

所有能源系统在其燃料循环的各个阶段都有可能发生恶性事故(通常定义为严重危及厂区外人员、财产和环境的事故)。构筑物或机械故障、工艺过程失控、人为差错,或诸如自然现象(地震和飓风)之类的外部事件,都可能引发事故。

2000年时欧洲电力部门采取了可实现的最大削减措施后的硫排放量

国 家	未削减时	消除的硫量	%	费 用
阿尔巴尼亚	200	64	32	23
奥地利	186	68	37	90
比利时	282	90	32	137
保加利亚	1 151	630	55	256
捷克斯洛伐克	1 303	723	55	301
丹麦	193	121	63	192
芬兰	203	36	18	119
法国	697	130	19	354
德意志民主共和国*	3 224	2 166	67	668
德意志联邦共和国*	1 499	799	53	1 214
希腊	523	396	76	255
匈牙利	805	479	60	189
爱尔兰	100	55	55	74
意大利	1 311	612	47	939
卢森堡	18	0	0	0
荷兰	210	65	31	117
挪威	71	1	1	3
波兰	2 182	1 006	46	618
葡萄牙	205	66	32	84
罗马尼亚	1 322	725	55	325
西班牙	2 126	1 556	73	600
瑞典	219	29	13	111
瑞士	54	7	13	16
土耳其	1 755	700	40	301
苏维埃社会主义共和国联盟	10 890	6 241	57	2 075
联合王国	1 765	974	55	1 474
南斯拉夫	1891	1 209	64	536
总计	34 385	18 948	55	11 068

注：排放量以千吨计。费用以百万美元（1985年）计。

* 这些数据是1990年10月德国统一前估计的。

来源：M. J. Chadwick, Stockholm Environment Institute (1990)。

以归一化单位发电量计，水力发电恶性事故所造成的即时死亡人数，似乎比其他能源的多。在试图比较各种能源系统的恶性事故时，必须考虑下述的一些具体问题：

- 在方法学上应注意两点：第一，应将此类风险与例行运行的风险分开描述和比较；第二，不应直接将历史事件（实际事件）的数据与未来可能发生事件的概率预测数据进行比较。

- 不能仅仅比较此类事故的后果。还应考虑事故的发生可能性（或概率）有多大。因此，需要估算此类事故的频度。作这种估计时必须要有有关过去此类事故及其影响的记录方面的可靠资料，并（或）要应用能预测今后此类事故发生可能性的概率

方法。

- 要评估或比较恶性事故的频度及其造成的健康与环境损害是比较困难的，因为单凭一个国家或一个国际机构是无法系统地搜集此类数据的。对于非核能系统来说尤其如此。相对于其他能源系统来说，核燃料循环方面的意外事件和事故数据更容易找到，而且比较系统。

- 尤其是关于非核能系统恶性事故造成的延迟健康效应，实际上既没有数据也没有进行过估算。在这些情况下，各种健康影响都是以即时死亡人数形式报道的，只有少数情况下同时报道当场受伤人数。这样就可能低估了非核能系统的总影响，给完善的比较工作带来困难。

- 最终的长期环境效应（尤其是恶性

事故引起的效应)是很难确定的。由于生态系统只是一次或偶尔受事故性排放物的侵扰,要确定这种效应是否不可逆的或有可能消除也许是困难的。

总的结论

对发电所用各种能源系统的相对风险评估的结果表明,在例行的运行工况下,核动力和可再生能源系统的健康风险比较小,而以煤和石油为基础的能源系统的健康风险比较大。风险大小的差异有可能接

近 10 倍。然而,所有燃料循环如果都采用最先进的工艺,就能以相对说来较低的健康和环境风险提供电力。但化石燃料排放 CO₂ 问题是个例外。因此,控制 CO₂ 的排放量是当前环境影响议事日程表中的首要议题。

相对风险评估通过向决策者提供可用来确定合适的发电模式和构成的关键数据,定能在能源规划中起越来越重要的作用。今后该领域的决策应该包括(作为一个优先事项)建立一个由国际协调的涉及各种能源的健康和环境影响的综合数据库。

归一化恶性事故死亡率(1969—1986年)

能源选择	事件数	即时死亡人数/事件	总计即时人数	生产的能量(GWa)	即时死亡人数/能量(人/GWa)
煤					
矿山事故	62	10—434	3 600	10 000	0.34
石油					
油轮倾覆	6	6—123	不详	21 000	—
炼油厂火灾	15	5—145	450		0.02
运输事故	42	5—500	1 620		0.08
天然气					
火灾/爆炸	24	6—452	1 440	8 600	0.17
水力	8	11—2 500	3 839	2 700	1.41
核能	1	31	31	1 100	0.03

注:化石燃料生产的全部能量估计值已乘以 0.35,换算成等效的电能输出,以便可与水力和核能比较。

报道的死亡人数系指即时死亡人数,不包括延迟死亡人数。对于切尔诺贝利核事故来说,延迟死亡人数的关系更大。

来源:素材取自 A. F. Fritzsche, "The Health Risks of Energy Production", *Risk Analysis* 9, No. 4 (1989)。

系统粗略的估计表明,核、石油和天然气系统恶性事故的人体健康风险,数量级相同,比水电的风险小两个数量级。然而,应用这些这些结论时,必须注意如下一些因素:化石燃料循环的事故往往报得少,而核动力厂事故数量又少,都使所得结果几乎没有统计意义。切尔诺贝利事故造成的延迟死亡人数,以及非核事故的延迟效应都未包括在内。