

架设辐射防护与安全之间的桥梁：

控制概率性照射

评述几个公用安全方针的演变

A. J. González 和 G. A. M. Webb

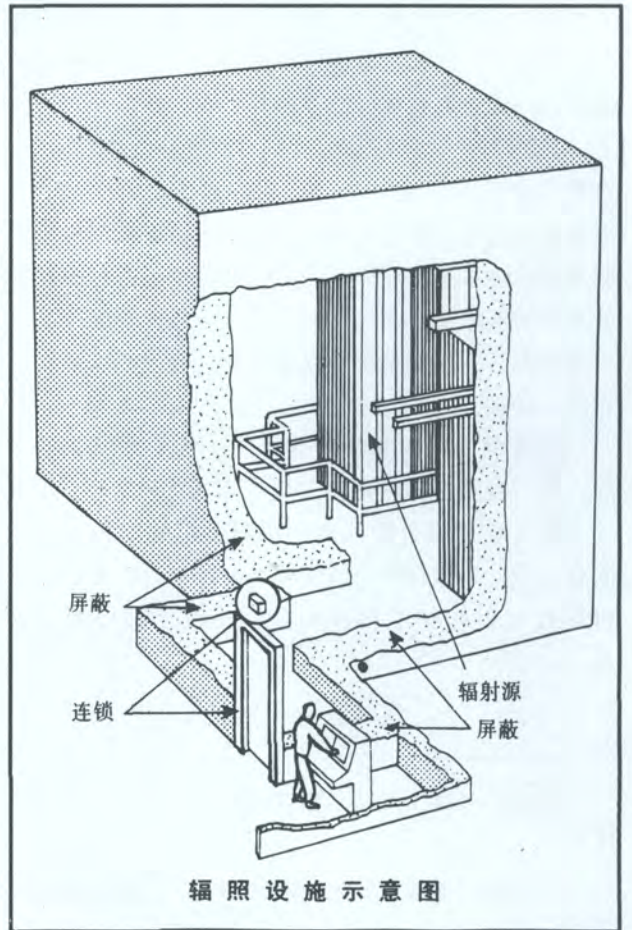
食品辐照设施的操纵员轻松地坐在厚厚的混凝土墙后面的控制台前。他知道，这个屏蔽足以挡住射来的辐射束。这种防护是由“剂量限制体系”决定的。该体系由国际放射防护委员会 (ICRP) 建议并被大多数国家管理部门和国际组织所采用。为了实施 ICRP 体系，世界上已制订了许多标准、准则和建议。仅 IAEA 就出版了 100 多个这类文件。操纵员知道，通过实际应用这些相互有关的法规，ICRP 体系的基本要点正在全世界范围内得到遵守。

不过，即使这样一种成熟的体系，也未能完全排除潜在的辐射危险。人们曾对在低剂量下产生的低辐射剂量的健康影响，提出过种种假设。根据这些假设，从受过相当高剂量和剂量率照射的人员的放射性流行病学数据估计的辐射危险度是，遭受每毫希沃特剂量时为 $1 / 100\,000$ 。屏蔽以外的剂量率是这样的低，以致任何长期呆在那里的人所受的剂量；至多不过几毫希沃特。操纵员自己受到的剂量更低。在上一年中，他受到几分之一毫希沃特的累积剂量，所以他在当年的危险度小于 $1 / 100\,000$ 。他认识到这是可以忽略不计的，比他每日面对的其他各种危险要小得多。这位操纵员满意他的工作条件，并且深信这种防护系统足以使他免受辐射源的伤害。

* * * * *

González 先生是 IAEA 核安全处辐射防护科科长。Webb 先生是联合国国家放射防护委员会秘书。本文表达的是这两位作者的观点，不一定反映他们所属机构的观点。

正当这位操纵员注视着控制台时，灯的闪烁表明，辐照室中出了故障，食品运输系统被卡住。于是，他就得进入辐照室去修理它。按照他的书面的操作规程，他按下一些控制钮将辐射源关闭，并将它沉



入屏蔽用的水池中。控制台上的一个指示器告诉他，这种操作是成功的。这时，他知道需要打开通向这个迷宫的门，进入辐照室进行修理。不过在此刻，他的头脑里闪现了一些问题——辐射源真的沉入水池了吗？的确已按计划正确地操纵了控制机构吗？他也知道，纵然这一关闭系统失效，当他打开通向迷宫的门时，另一个与门相连的联锁安全系统也肯定会把辐射源关闭。但是，如果连这个安全系统也失效了，将会怎样？那时他将会因受到极强照射而严重烧伤……他耸耸肩——为什么要担心可能性这么小的事情呢。于是这位操纵员大胆地进入了辐照室。毕竟，人们曾告诉过他，这些安全系统属于最新的经过考验的设计，制造的质量符合优良工程标准。事故性的过度照射是极不可能发生的。

* * * * *

“不可能的”是科学家们不愿使用的一个词。他们喜欢用现象的必然性（或不定性）来描述它们发生的可能性，用称为概率的量来度量这种必然性。让我们考虑一下上述辐射危险的两种可能的情况：一种情况是，有发生照射的必然性，随后便有由这部分照射引起辐射伤害的可能性。另一种情况是，仅有受到照射的可能性，但如果真的发生照射，则根据剂量水平的不同，也许会有辐射伤害的必然性。在这两种情况下，我们都可以评估辐射危险：^{*} 在第一种情况下，这种危险正比于剂量；在第二种情况下，它正比于照射概率与剂量的乘积。借助各种技术系统我们可以控制这种危险水平。例如，在第一种情况下，控制系统就是辐射屏蔽层，而控制参数是屏蔽层的厚度。在第二种情况下，控制系统是联锁装置，而控制参数便是它的可靠性。

通常称为辐射防护的学科，一般处理第一种情况。第二种情况，一般由安全专家们去研究。

本文描述供处理这两种情况公用的安全方针的演变过程。如能找到公用而相互协调一致的方针，便可以使辐射防护学科和安全学科建立起协调的关系。

^{*} 危险一词在这里表示辐射照射所引起的严重伤害的概率。

^{**} 控制一词在这里表示施加的限制，而不是检查或核实。

涉及辐射照射的几种情况

在预测辐射照射的几种可能情况时，可以设想以下三种类型：

- 预料的情况。在这些情况下，人员的照射是计划之中的事，因而被认为是必然发生的（即其概率为100%或接近100%）。

- 可以预料的但不是必然发生的情况。不过，如果这些情况发生，将使人员受到照射。

- （实际的）情况。人们也许曾经或者未曾预期它们的发生，如果它们发生，人们所能采取的只能是补救行动。

电离辐射的防护，通常是根据国际放射防护委员会（ICRP）的建议进行的。这些建议所涉及的照射情况，都不是特定的。不过，在实际工作中，这些建议已用于第一类照射情况，并部分地用于第三类照射情况。ICRP 建议主要适用于涉及假定照射必然会发生的某些情况。这类照射在本文中称为“必然”照射。这个术语，大致包括人们在实际工作中所说的“正常”照射和“例行操作事件”中的照射。这些建议尚未实际用于第二类照射情况，即可能发生的概率小于100%的照射。这些照射在本文中称为“概率”照射。

许多执行 ICRP 建议的国家标准和国际标准，都已默认这一事实。^{*}

“必然”照射：防护政策

对于“必然”照射，ICRP 推荐了一个剂量限制体系，它包括下述三项相互有关的要求：^{**} (a) 若引

^{*} 例如，IAEA、国际劳工组织（ILO）、世界卫生组织（WHO）和经济合作和发展组织核能机构（NEA / OECD）的《辐射防护基本安全标准》承认“两种不同的照射条件，它们是：(i) 照射的发生是可预见的，并可通过对源的控制和应用剂量限制体系加以限制的照射条件（正常照射条件）；(ii) 照射源不受控制，以致后来发生的任何照射不管怎样只能依靠补救行动来限制其规模的照射条件（异常照射条件）”。条件 (i) 显然适用于本文提到的涉及“必然”照射的情况，并且也许部分地适用于预料的情况。条件 (ii) 适用于已经发生的情况。上述《基本安全标准》显然完全适用于条件 (i)，但仅几条一般规定可扩大到条件 (ii)。

^{**} *Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 26, Annals of the ICRP, Vol. 1, No. 3, Pergamon Press, Oxford (1977).*

进的某种实践不能带来实际的纯利益，则不得采用此种实践（即实践的正当性）；(b) 在考虑到经济和社会因素之后，一切照射应保持在可以合理达到的最低水平（即防护的最优化）；(c) 个人所受的剂量当量不得超过 ICRP 对相应情况所建议的限值（即个人剂量限值）。

值得做的是，在可能延伸到“概率”照射的范围内，分析一下“必然”照射的这三个基本政策原则。

实践的正当性。这个原则只规定，为了允许引入一种辐射实践，应当预见到利益多于危害。不过，正当性含义至今尚未由 ICRP 或其他组织加以全面分析。况且，当这个原则从“必然”照射的限定范围用到“概率”照射的更宽范围时，正当性原则的实际运用将变得更加复杂。对于某些情况来说，发生的概率可能是很低的，但是，如果发生这种情况，其后果可能是严重的。目前还不清楚，对这些情况应当如何进行正当性的估价。

防护的最优化。ICRP 曾用这个术语来表达它的意图，即一切剂量均应保持在从现有经济的和社会的因素考虑，可合理达到的最低水平。^{*}不幸的是，这个简单的要求已经被许多人误解为代价—利益分析的同义语。早已明确地指出过，这种最优化的实施，不一定要使用任何特殊的辅助决策技术，例如代价—利益分析，而且这种最优化适合于任何适宜的方法，包括简单的直觉和共同的感觉。^{*}这种关于最优化的更概括的阐述，对于将最优化原则推广到与“必然”照射有关的那些情况限定范围之外，是必不可少的。

个人剂量限值。ICRP 建议的这些限值适用于来自人工辐射源的“必然”照射。不过，ICRP 在确定这些限值时认为，它们有用于“概率”照射的可能性。如果当时未将这种情况包括进来，那么这些限值的数值便会与现在的不同。

鉴于这些剂量限值适用于一些个人，而且单个人也许会受若干个源的照射，ICRP 和 IAEA 还建议使用上限一词。单个源所造成的剂量的上限，被定为用于所有源造成的总照射的剂量限值的几分之一。

“概率”照射

正如上面所讨论过的，ICRP 的剂量限制体系，

包括人员辐射照射预料要发生的和源是可以控制的全部情况。虽然这些原则是普遍适用的，但它们不可能以其目前形式，用于控制那些或许引起或许不引起照射的源。所以，对于“概率”照射来说，ICRP 体系是不能直接应用的，但它的基本原则可以发展来适用于这样一些照射。为了这样做，剂量限制体系必须以概率和剂量控制这两者，而不是只以剂量控制为基础。

实际上，所有与辐射源有关的预料情况，都涉及“必然”照射和“概率”照射。这两种照射的相对重要性可能因不同的源而有很大差异，但大体上说，所有的源都应当考虑两种照射。在抽象情况下，如何区分这两种照射的问题常常是不易解决的，但对于任何一个具体的源来说，解决这个问题却不很困难。例如，一次常规照射也许由一些个别事件造成；如果这些事件相当频繁，也许存在一种使这种照射成为“必然”的倾向，而如果这些事件不是经常发生的，则它们所造成的照射也许被纳入“概率”照射范畴。

从安全的角度描述辐射源特性的一些量，将随所考虑的照射情况而有所不同。对于涉及“必然”照射的情况，有关的量是剂量分布。这种分布通常由这个源所造成的最大个人剂量和集体剂量来表征。这两种量对于在正常操作中所预料的低剂量来说，通常就够用了：个人受到的递增剂量被认为将产生与其成正比的递增伤害，所以，正象个人剂量是个人伤害或危险的一种量度一样，集体剂量便成为预料的总危害量度。就“概率”照射而言，确定个人伤害或危险的概率也是可能的，其方法是将个人剂量发生概率与该剂量诱发伤害的概率相乘。由此可见，后果的概率分布也是可能确定的。

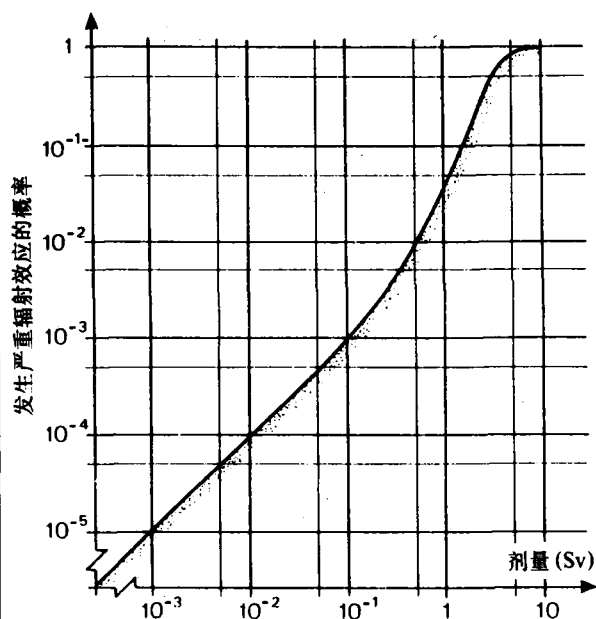
控制“必然”照射和“概率”照射：并行开发

人们已经开发了一些用来评价和控制“概率”照射的程序。这些程序是平行于并在某种程度上独立于上述辐射防护基本原则开发的。人们已在国家一级针对某些“概率照射”源，尤其是针对核动力堆，制订了辐射安全目标，并且在某些核安全原则方面，国际上似乎正在形成一致的意见。^{*}与废物处置有关的评价和控制程序，虽然也早已开始单独地发展，但只

^{*} *Cost benefit analysis in the optimization of radiation protection*, ICRP Publication 37, *Annals of the ICRP*, Vol.10, No.2/3, Pergamon Press, Oxford (1983).

^{*} *Basic safety principles for nuclear power plants*, IAEA Safety Series 75-INSAG-3, IAEA, Vienna (1988).

用于辐射防护目的剂量 - 危险关系曲线



上图表示用于辐射防护目的的剂量 - 危险关系曲线。图中有三个区域可被确认：(1) 当剂量低于零点几希沃特 (Sv) 时，只发生随机性效应，且其发生概率与剂量水平成正比。这些随机性效应包括受照个人中的致死癌症，和受照个人相继几代后代中的严重遗传效应。在这个范围内，人们假设，效应的概率随剂量增加而成正比的增加。这不一定是放射生物学数据的确切表达，但应该视为一种适用于规划目的的简单而实际的假设，而不是用于受照人员的评价工具。因此假定，在这个范围内危害概率同剂量有线性关系。就辐射防护目的而言，一般将这些直线的斜率（即这个区域内的危险度）取为 $1.6 \times 10^{-2} / \text{Sv}$ 。有关原子弹幸存者的新的放射性流行病学资料似乎表明，这种危险度在将来也许会改变；(2) 在短时间内受到的剂量占到 1Sv 的一个较大的分数时，可能发生非随机性效应。剂量 - 危险关系曲线接近于 S 形曲线。如在随机性效应范围那样，关系曲线的确切形状取决于许多因素，例如，可能与照射的具体情况有关的剂量率。对于接近 3 Sv 剂量来说，死亡概率约为 0.5；(3) 最后，假定在短时间内受到的剂量高于 5—10Sv，则所有实际受照的个人将会患急性放射综合症，并最终因受照而死亡。因此，在剂量高于 5—10Sv 的情况下，这种关系曲线被认为逐渐接近 100% 的死亡概率。

议，前后一致地处理日常的潜在照射已有了共同原则。至于 IAEA，它最近已制定出一个有关将辐射防护原则应用于可能造成照射的各种源的咨询文件，目的在于促使形成辐射安全方面的统一方针。*

辐射安全政策的基础

一种辐射安全政策，一般应包括所有照射条件，即“必然”照射和“概率”照射条件的全部情况。这样一种政策应以辐射防护所用的危险与剂量的相互关系为依据，而这种关系，则是以许多放射生物学假设为基础的。一个全面的辐射安全政策，应该承认剂量超过限值和上限，甚至达到会产生严重“非随机性”效应的剂量范围等情况，都有相当的概率。所以，阐明这些假设是特别重要的。这种剂量 - 危险关系，可以用作共同的安全政策的基础。（见附图。）

走向统一的政策

有一种意见认为，应该把规定个人危险的限值，作为贯彻总的辐射安全特别是控制“概率”照射方面统一方针的一项条件，这一条件虽不充分但却是必要的。现在看来，集中考虑这种意见是有道理的。另一种有吸引力的意见是，寻求某种与现行剂量限制体系相容的办法，并因此指定用于任何个人受到危险的总限值，以及研究在这个总限值以下，通过扩展最优化概念把受照射群体全部危险考虑进去后，安全能在多大的程度上得到改善的问题。从道理上说，这是很有吸引力的意见。关于在概率照射方面的个人限值和最优化的两种意见，正在进一步研究和完善中。

不过，必须强调，许多核安全专家还按照他们设想的“社会风险限值”或“社会风险目标”这样一些标准来考虑“社会风险”。** 这些社会方面的标准，看来已超出个人剂量限制和最优化诸条件的直接延伸的范围。不过，它们也许与正当性这个条件有联系，但这种潜在的联系不属于本文分析的内容。

是现在通过扩充和发展 ICRP 的基本建议，使其涉及废物管理的具体问题，才得到了解决。* 已就所有这些有关方面的问题，提出了有关统一的控制方针的建

* "The application of the principles of radiation protection to sources of potential exposure: Towards a unified approach to radiation safety" (a consultative document), IAEA, Vienna (1988).

** Status, experience and future prospects for the development of probabilistic safety criteria, report of a technical committee meeting in 1988, IAEA TECDOC (in publication).

* Radiation protection principles for the disposal of solid radioactive waste, ICRP Publication 46, Annals of the ICRP, Vol.15, No.5, Pergamon Press (1985).

个人危险限值

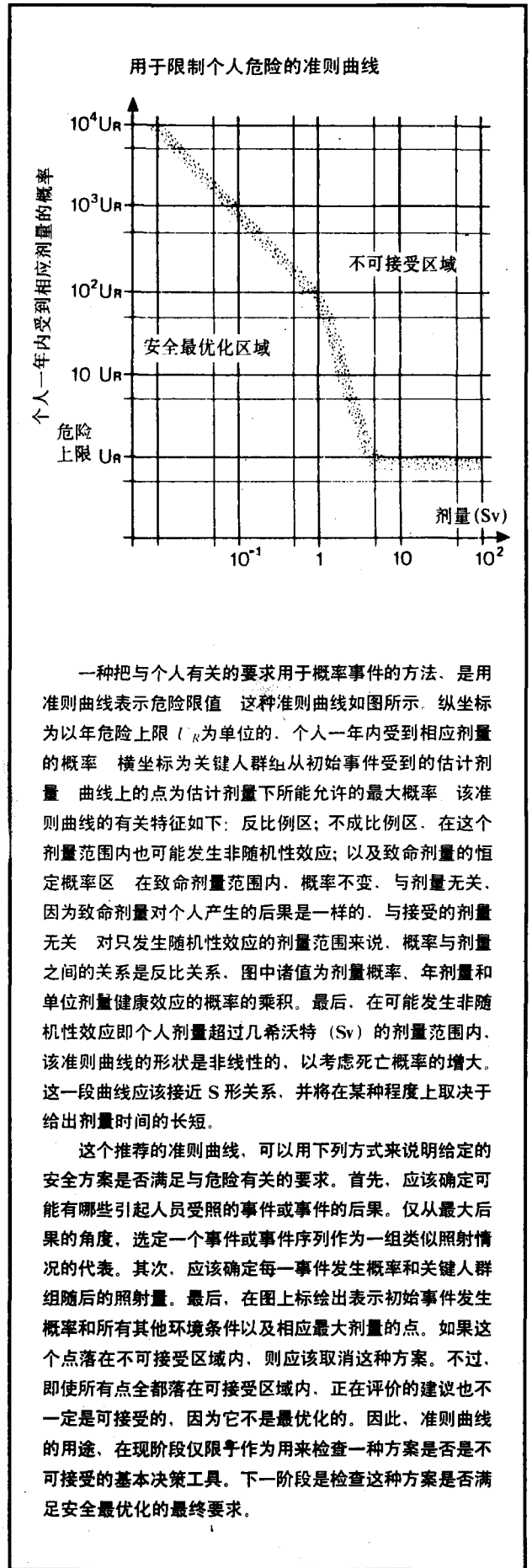
ICRP 建议的用于公众中个人的现行剂量限值 1 毫希沃特 (mSv) / 年, 相当于约 10^{-5} 的待积危险, 并可用于制定个人危险限值标准的参考值。对于在这个剂量限值以下的常规照射, 必须考虑的唯一健康影响是癌和遗传效应。如果现在将这个剂量限值换算为危险限值, 则对剂量本身的这种限制被消除; 因此必须考虑另一些健康影响, 如高剂量造成的死亡等。从原则上说, 没有必要对各种健康影响给予同样的重视, 例如, 如果将人一年的损失当作一个加权函数, 则由高剂量造成的急性死亡将比潜伏期后发生的癌造成的死亡有更大的权重。不过, 为了简单起见, 在限值 (而不是目标) 方面, 把这些健康影响看成同等严重, 看来是适宜的; 然后便可确定单一的数值, 作为用于所有概率性事件的危险限值。

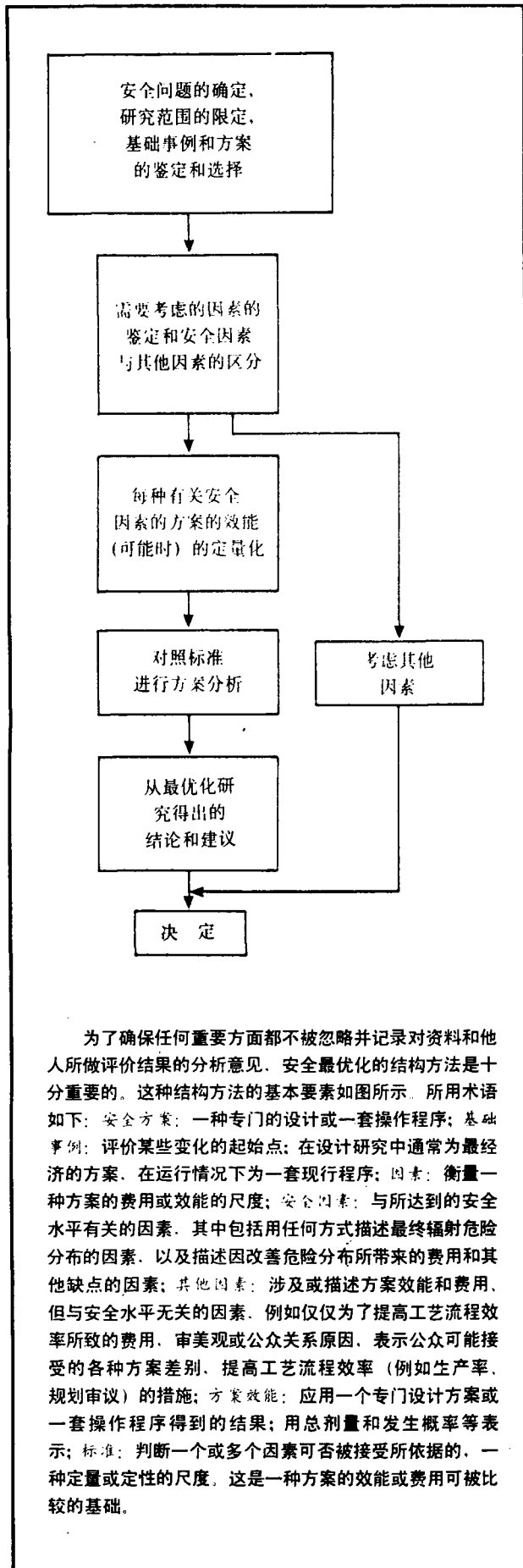
所以, 为了与剂量限值的一般安全标准相一致, 已提出了一年中危险限值为 10^{-5} , 这个危险限值将用于与个人有关的辐射安全评价。该限值将适用于受到来自所有潜在照射源 (天然辐射源除外) 的、最高照射的个人 (患者除外) 的危险。重要的是, 应知道这个危险限值将处于不可接受危险范围的下限; 在这个限值以下的危险未必被人们看作是可接受的。

由于个人可能处于由多个源造成的危险状态, 所以, 除这个危险限值 (它针对个人) 以外, 还需要有一个与源有关的危险上限 (即与照射情况有关的危险上限), 后者限定来自单个源 (即一种照射情况) 的个人危险。这一危险上限占危险限值的一部分 (即定为后者的几分之一), 并视所考虑的源或照射情况而定。按一个源规定的危险上限, 要以目前剂量上限相同的方式, 用于某一设施的设计和管理。将概率照射情况纳入一个以危险为基础的辐射防护体系的最简单方法是, 在保留正常操作的现有剂量上限的同时, 确定单独的概率照射危险上限。

根据危险 - 剂量关系的直接推论, 可以给出一条限制每种照射情况的个人危险准则曲线, 该曲线是随所选定的危险上限而异的。* (见前面的危险 - 剂量关系图。亦见所示准则曲线的附图。)

* "The regulatory use of probabilistic safety analysis in Argentina", by A. J. González, in *Proceedings of the international meeting on thermal nuclear reactor safety*, Chicago, USA, NUREG/CP-0027. (1982).





安全最优化

确保任何个人都不遭到过高的辐射危险，是一个保证辐射源适当安全水平的必要的但不是充分的条件。现在问题仍然是，应不应该考虑以下情况来进一步改善上述安全水平：例如，许许多多个人就单个来说遭受的危险是低的，而就总体来说他们也许相当于一个高到不可接受的伤害总期望值。

对于“必然”照射情况来说，人们要求用于源的辐射防护必须进行最优化。这个要求通常使个人剂量大大低于个人剂量限值。辐射防护最优化的概念，涉及选择最适宜的辐射防护水平，同时要考虑许多因素，其中主要的有：(1) 以集体剂量表示的受照射群体的总伤害；(2) 辐射防护代价。不过人们也认识到可能还要考虑一些其他因素，例如剂量分布等。这样，最优化的过程便可认为是使用辅助决策技术的过程。由于最后决策中还要考虑其他因素，其中有些因素与辐射防护无关，所以最优化的结果只能部分地影响最后决策。

显然，在全面评价“概率照射”情况下的期望伤害值时，要考虑受影响的人数、他们受到剂量的概率和水平，以及包括各种费用在内的为改善安全所需的全部工作。这种情形与辐射防护最优化有关的意见是相当接近的，这样，研究如何将这种概念延伸到以危险为基础的辐射防护体系，是合乎情理的。

在推广这种体系时，有两种作法是很有用的，一是集中考虑最优化的“辅助决策”概念，一是扩大所涉因素的个数以包括各种潜在照射的概率和后果。此外，将最优化视为决策方面的一种结构方法，也是有益的。(见附图。)在推广最优化时，不宜作出有关各种类型健康影响的等值假设，在制订危险限制标准时，人们为了方便，曾采用了这种假设。在这种场合，分别地考虑在非随机性效应特别是急性死亡方面的后果和随机性效应后果，也许更加可取。

在“必然”照射防护的最优化方面，由 ICRP 提出并为 IAEA 采纳的有关量是“伤害”(detriment)，它被定义为受辐射源影响的一群人伤害的期望值。对于概率照射来说，使用伤害这个概念也许不是简单明了的。这点可从下例看出：* 让我们考虑这样一种事故序列，它的发生概率 P 是低的，但如果它发生了，它的后果 C 却是严重的（当然，如果不发生，它不产生任何后果）。伤害期望值则为 PC 乘积。如果 P 很小而 C 很大，则伤害将是一个中等大小的值。这

样的值并没有充分定量地说明或有严重后果或没有后果的状况。换言之，这种在后果大小方面很大的不定性不能为决策者提供数据，所以不能将它纳入决策过程中。这样，对于评价这些情况下的方案来说，伤害也许不是一个有用的量。所以，对于“概率”照射来说，须加以比较的一些量，除各种安全工作外，还应包括概率和后果的全面分布。

除了存在哪些量要比较的问题外，还有一个如何将那些不能以同单位表示的量或优先权纳入比较过程的问题。这些优先权是应当明确考虑到的，它们包括：人们对后果较严重事故的危险性的反感程度、限制措施或种种不便造成的社会开支、各种类型辐射效应引起的发病率和死亡率，以及这些效应的相对权重（即相对重要程度）。

关于不可直接线性地比较的一些比较量问题，可借助效用函数和决策理论来处理。* * 用于把各种量分类的优先权，一般用效用函数表示。这个函数规定，为了比较起见怎样将不同类型的量加以组合。然后，使用辅助决策技术将得到的效用函数加以组合，以达成“在给定情况下最好的”（即最优化的）方案。这类辅助决策技术的应用情况，正由ICRP的一个特别工作组进行探讨，并已概要地作了介绍。* * *

展望：统一的政策；有待解决的问题

总之，在限定个人危险上限情况下，以安全优化原则为基础的危险限制体系，连同现行剂量限制体

系，可构成辐射安全统一政策的基础。

不过，就成功地实施这项政策而言，尚有一些实际问题需要进一步研究；它们包括：

- 概率安全分析涉及的许多不定性。跟着而来的是人们对所得的结果缺乏把握。这样一点，在确定有关安全目标时所取的安全系数中，或将所得结果与安全目标进行比较时，照理应有所反映。例如，用危险限值或危险上限作为一种安全目标，而不是作为对这种目标的一种约束条件，可能在这方面造成许多困难。所以应该清楚地知道，危险限值和危险上限不能解释为安全目标或安全目的。相反，它们可解释为一个禁区的界限，它们应当有必要的的安全系数，以适应预料中的许多不定性。

- 目前，尚无任何标准化的手段可供进行概率分析用。如果未对概率分析中所用的一套方法和边界条件作出足够详细的规定，则同一情况会得出大不相同的结果。这会产生一种不希望的情形，即对同一情况所作的两种分析，一个结果可能符合既定危险限值，另一个结果可能不符合。为了解决这个问题，看来需要制订一些标准化的概率安全分析方法，并将它们纳入相应的规章中。不过，这可能不符合一些采用非指令性方针的国家的管理准则。

- 另一个问题是危险的可测量性和可衡算性。对于“必然”照射来说，“有效剂量当量”被用作被照射人所受危险的一种间接量度。虽然这样一个量的测量要用到其他有关的物理量和各种假定和假设，但它毕竟是“可测量的”，所以可写入具有法律性的有关文件中。对于“概率”照射来说，情形便大不相同：如果确实发生了照射，人员受到的有效剂量当量，并不能衡量危险的大小（由于这种照射也有可能不发生），并且不存在其他任何“可测量的”和“可衡算”的量。安全系统的可靠性、合乎逻辑的照射概率，或概率与剂量的组合，从仪器意义上讲都是不可“测量的”。它们也许不能被作为记录用的量。所以，后验性符合便不是法律上“可以证明的”。虽然也许存在解决这个法律问题的许多途径，但尚待我们去探索。

鉴于这些问题的存在，一些安全专家在将一种危险限制体系用到核动力厂时表现出很谨慎的态度。他们宁愿集中考虑总的概率目标。其他一些专家认为，尽管存在许多实际困难，仍应促进有关危险限制的基本体制的建立。我们认为，后一种观点是值得追求的，并完全有成功的希望。

* “Critical views on the application of some methods for evaluating accident probabilities and consequences”, by D.J. Beninson and B. Lindell, *Current nuclear power plant safety issues*, IAEA (1980).

** 见作者 D. J. Beninson 的两篇论文：“Optimization of radiation protection as a special case of decision theory”, *Optimization of radiation protection*, IAEA, Vienna (1986)；和“Application of radiation protection optimization principles to potential exposures from accidents”, *Nuclear power performance and safety*, Vol. 4, IAEA, Vienna (1986).

*** “Decision-aiding techniques for Radiological protection”, by G. A. M. Webb and J. Lombard in *Radiation protection in nuclear energy*, proceedings of the IAEA conference in Sydney, April 1988 (to be published).