

2 辐射防护最优化中的代价与利益分析

国际放射防护委员会第37号出版物

原子能出版社

国际放射防护委员会第37号出版物

辐射防护最优化中的 代价与利益分析

国际放射防护委员会第4专门委员会报告

(委员会1982年6月通过)

李树德 译

原子能出版社

ICRP Publication 37
Cost-Benefit Analysis in the
Optimization of Radiation Protection
ICRP, Pergamon Press, 1983

国际放射防护委员会第37号出版物
辐射防护最优化中的代价与利益分析

李树德译

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

原子能出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本787×1092 1/32·印张43/8·字数98千字

1985年3月第一版·1985年3月第一次印刷

印数1—4240·统一书号: 15175·588

定价: 0.70元

内 容 简 介

本书是国际放射防护委员会（ICRP）发表的一份技术报告。书中论述了作为剂量限制体系一部分的最优化要求的原理和实施办法，介绍了辐射防护最优化中“代价与利益分析”的应用领域、判断标准和运算方法，并列举了内外照射防护系统设计，放射性物质的运输、医学应用、消费品使用以及核动力厂操作等过程中的辐射防护最优化作为计算实例，加以说明。

本书可供辐射防护人员、放射医学与放射生物学工作者、科研生产管理人员以及大专院校有关专业师生参考。

序（摘译）

国际放射防护委员会（ICRP）于1978年5月委托第4专门委员会以 A. J. Gonzalez 为主任的一个工作小组编写一份报告，论述了作为剂量限制体系一部分的最优化要求的原理和实施方法。这份报告的技术部分包括：（i）应用代价与利益的分析实施辐射防护最优化的各种方法（即本报告 B 节），（ii）辐射防护最优化中代价与利益分析的实际应用（即本报告 C 节，连同附录和附件）。委员会在1981年批准了这份报告的技术部分，但它认为在报告的前面应当增添一部分导论性质的文字。D. J. Beninson 受托撰写了这部分文字，对辐射防护最优化中运用的代价与利益分析提供了一般性的论述，列为本报告 A 节。委员会在1982年6月通过了最终报告。

目 录

序

A. 通论	1
引言	1
辐射防护最优化的应用领域	2
辐射防护最优化的用于决策的分析	3
辐射防护最优化的判断标准	6
辐射防护最优化的中代价与利益分析的理论基础	9
B. 运用代价与利益的分析实施辐射防护最优化的各种方法	11
基本概念和量	11
危害	11
危害的概念	11
客观健康危害	13
其他危害成分	16
集体剂量	18
集体剂量的概念	18
集体剂量和客观健康危害	18
集体剂量率和集体剂量负担	19
不完全集体剂量负担	19
集体剂量和其他危害成分	20
代价与利益分析的运用	21
一般概念	21
代价的估量	27
防护代价	29
—原始代价的估计	29
—现值估价	30

—资本化代价方法,或代价分年估计	31
辐射危害的估价	32
—通用的公式	32
—对预期寿命的改变进行的估价	34
— α 的值	37
分布问题	37
定量的最优化技术	39
理想的最优化事例	39
复杂系统的最优化	41
—通用的公式	41
—独立子系	42
—相互关联的子系	43
C. 辐射防护最优化中代价与利益分析的实际应用	45
通过设计实施辐射防护最优化	45
通过外照射防护系统实施辐射防护最优化事例概述	47
通过简单屏蔽的设计实施辐射防护最优化事例	48
通过内照射防护系统实施辐射防护最优化事例概述	51
通过通风和空气净化系统的设计实施辐射防护最优化事例	52
通过限制放射性物质排入环境实施辐射防护最优化事例概述	58
操作过程中的辐射防护最优化	60
放射性物质公路、铁路和水路运输的辐射防护最优化事例概述	63
医学上应用辐射的辐射防护最优化事例概述	65
放射诊断	67
放射治疗	68
核医学	69
使用消费品的辐射防护最优化事例概述	69
核动力厂操作的辐射防护最优化事例概述	71
个人操作的辐射防护最优化事例概述	75
附录A 设计辐射源的简单平板形屏蔽的辐射	

防护最优化——代数例题.....	78
附件A: 设计简单屏蔽的辐射防护最优化——数值例题.....	82
附录B 设计简单的非专用通风系统的辐射防护最优化——代数例题.....	83
附件B ₁ 通过通风系统实施辐射防护最优化——二个数值例题...	86
附录C 与氡污染有关的变量及其对最优化程序的影响...	89
附录D 对环境中的氡设计通风系统的辐射防护最优化——代数例题.....	94
附件D ₁ 改革矿山通风系统的辐射防护最优化——数值例题.....	99
附录E 设计简单空气净化系统的辐射防护最优化——代数例题.....	103
附录F 控制放射性物质排放的辐射防护最优化——计算步骤示例.....	105
附件F ₁ 控制沸水堆气体排放的辐射防护最优化——数值例题...	106
附件F ₂ 控制后处理厂碘-129的辐射防护最优化——数值例题...	108
附录G 核医学操作中的辐射防护最优化 示例.....	110
附录H 家用天然气的辐射防护最优化 示例.....	112
符号表.....	116
参考文献.....	123

A. 通 论

引 言

(1) 委员会在 ICRP 第26号出版物第12段中总结了它所建议的剂量限制基本体系^[1]。这个体系包括相互关联的三个组成部分:

(i) 若引进的某种实践不能带来超过代价的净利益, 就不应当采取这种实践。

(ii) 在考虑到经济和社会因素之后, 一切照射应当保持在可以合理达到的最低水平。

(iii) 个人所受的剂量当量不得超过委员会对相应的情况所建议的限值。

(2) 这三个组成部分, 委员会用下列简略化的语言表述:

(i) 实践的正当化;

(ii) 辐射防护的最优化;

(iii) 个人剂量当量的限值。

(3) 本报告主要涉及剂量限制体系的第二个组成部分, 即辐射防护的最优化, 并且论述控制辐射照射使之保持在可以合理达到的最低水平所依据的基本原理和技术。

(4) 可以用于辐射防护最优化的技术是很广泛的。某些技术取之于运筹学, 某些取之于经济学, 某些取之于工程学。使用任一种技术总是或明或暗地包含着关于最优化目标的价值判断。

(5) 辐射防护最优化中使用的技术包括(然而不限于)以代价与利益的分析为基础的一些程序,在本报告中将要详细讨论的正是这些程序。但是应当认识到,其他技术,有的是定量的,有的是带有定性性质的,也可以用于辐射防护最优化。

辐射防护最优化的应用领域

(6) 辐射防护最优化适用于辐射照射能通过防护措施加以控制的一切场合。在选择和设计各种装备的防护系统,以及在进行操作的过程中,最优化是一项重要的考虑。虽然严格地说,最优化作为剂量限制体系的一个组成部分,只适用于辐射源受到控制的情况,然而类似的考虑也可用来规划一旦遇到事故时将要采取的某些防护措施。

(7) 随着用途的不同,在辐射防护最优化所用的技术中,定量化的程度也有所不同。各种装置和防护系统的设计者倾向于使用更为定量化的技术,来决定满足最优化要求的防护水平(屏蔽厚度,密封度,通风率,等等)。主管当局对于给定类型的装置、辐射源,或者包含着辐射照射的实践,也许采用已经成为常规的定量的最优化技术,来制定合适的管理限值(authorized limits)*和要求。

(8) 关于操作过程中的辐射防护最优化,定量化的程度通常要低一些,虽然不一定总是如此。在这种场合下,最优化包括下列一些决定:工作人员的名额和资格,所用的个人防护设备,工作的组织,所需的监测。辐射防护最优化的

* 在ICRP第26号出版物中译本中,译为“特准极限”。——译者注

定量评价并不适用于日常操作的实践。负责日常操作中的辐射防护的那些人员，将遵循主管部门或企业代理人根据最优化原则而制订的较为简单的规则。此外，他们也许把辐射防护最优化的一般企图作为指导，然而按直观的而不是按定量的方式行事。把照射保持在“可以合理达到的最低水平”这一态度，在辐射防护中并不是新鲜的事，不过在委员会现在的建议中给予鼓励，这些建议强调不能满足于刚好在剂量限值之下操作。

辐射防护最优化用于决策的分析

(9) 某一设施、辐射源或包含着辐射照射的实践将在一些人员中给出大小不等的辐射剂量。如同剂量限制体系的第三个组成部分所规定的那样，需要足够的防护来保证所有受到照射的个人接受的剂量不超过相应的剂量限值。

(10) 委员会为了辐射防护的目的作出了一项基本的假设：在辐射工作所遇到的剂量范围内，在剂量与随机性效应发生几率之间存在着正比关系。这个假设的一个推论是，剂量具有相加性，就是说，剂量增加相等的数量则危险也增加相等的数量，这个数量与在此以前已经积累的剂量无关。假设的另一个推论是，从原则上说，只要提高辐射防护水平以减少照射，在给定情形下的辐射危险就可以降低到所需要的任意小的程度。

(11) 按照不同的方式提高辐射防护水平使之超过满足剂量限值所需的水平，除了导致不同的代价和不同的危险之外，将使剂量的分布发生不同的改变，此外还将带来与辐射无关的操作方面的不方便。显然，假如提高防护水平将使一

切有关因素朝着有利的方向改变，那么采取这样的方针是理所当然的，这将是朝着可以合理达到的目标前进的一个必要的步骤。

(12) 然而情况往往并不如此。一般地说，较高的防护水平花费的代价较多，而且选择不同的改进防护的方案所导致的减少剂量的结果在不同的受照群体中也将有所不同，有时把照射从一个群体转移至另一个群体。

(13) 因此，选择能满足最优化要求的防护水平是一种牵涉到许多因素的决策，其中某些因素也许会同另一些发生矛盾。这些因素包括个人的辐射剂量，可能被选择的防护水平的代价和困难，对于工作程序产生的影响，以及这一决策预期会产生的其他一切影响。

(14) 制定决策的程序在原则上是把第13段所列举的每一因素考虑进去，评价所有可供选择的防护方案。这种评价联系到明确提出的，或隐含着的优先选择的判断标准。好几种方法可以用于制定决策。有一些方法只是在各种选择之间作出比较。例如，所谓**多标准方法**(multicriteria methods)是考虑到所有的判断标准，在各种方案之间两两地进行比较，以决定哪一种方案比另一种方案为优，重复地进行这一过程直到得出最后的决策。在这些方法之中，一种方案被认为优于另一种方案，如果有足够多的标准判定前者为优，而且以其余的标准来衡量，彼此的差别不大。这两个条件要求对这些标准指定相对的权重因子。多标准方法通常可以预选出一些较优的方案，但是一般地说不能完全地排列出优劣的名次。这些方法的价值在于它们考虑到许多判断标准，并且提供了处理定性问题的一种简单的程序。

(15) 其他一些方法是所谓**总计法**(aggregative met-

hods), 它们不是两两地比较不同的选择, 而是试图把每一种选择所依据的各种判断标准的价值合并为单项的价值, 然后把不同选择的价值排列成等级以选出最好的一种。这些方法的一个固有的要求是对各种判断标准作出合适的定量表示。应用最广的总计法是根据效用函数 (utility function) 来定量地表示不同的判断标准。效用函数是一种标度 (scale), 用 0 与 1 之间的数字 (称为效用数) 来表示一项判断标准的可能的价值, 这些数字是按照这样的方式指定的, 如果某一种结果优于另一种结果, 则前者的效用数大于后者。

(16) 效用函数不一定是线性的, 而且这种函数除了根据决策人对某一种判断标准的喜爱程度以外没有其他根据。决策是以每一种选择所涉及的若干个效用数合并而得的一个总效用数为根据。在这过程中, 对每一种判断标准赋予一个权重因子, 以计及各种判断标准的相对重要性。最佳的选择是使总效用数达到最大的那种选择。

(17) 以效用函数为基础的一个重要的, 然而不是唯一的方法是**代价与利益分析**的这个特例。这种方法假定所有的判断标准都能用货币额表示, 而且效用数与货币化的判断标准之间存在着线性关系。在代价利益分析中, 不同判断标准的权重就是表征那种判断标准的单位量的货币价值*。

(18) 关于这些定量的决策方法, 有一点必须注意。所选择的防护水平以及达到该水平所用的系统是否最优, 在很大程度上依赖于分析过程中运用的判断与数据的好坏。因此

* 例如, 某种辐射照射实践所给出的集体剂量当量 (人·Sv) 是辐射防护水平的一种判断标准, 每人·Sv 的货币价值 α , 就是这种判断标准的权重因子。——译者注

有必要评价如果某些或全部判断和数据略有变化，所得的解对这些变化的敏感性如何。这种敏感性的评价可以鉴别出决策中的关键性因素，并使所采取的解决方法更有意义，特别是当问题比较复杂的时候更是如此。

辐射防护最优化涉及的判断标准

(19) 为了定量地表示辐射的有害效应，委员会引进了“危险” (risk) 和“危害” (detriment) 这两个概念。某一给定的剂量所伴有的危险，是指一个人由于所接受的剂量而遭受某一特定的辐射效应的几率。在另一方面，危害被定义为在受照群体中产生的损害的数学期望值，这里同时考虑各种可能的有害效应的发生几率和严重程度。有害效应包括随机性效应和非随机性效应（有时总称为**客观健康危害**），此外还包括受到危险的个人的担心和不安，以及由于发生辐射照射而施加的限制对个人的舒适带来的不利影响。

(20) 在剂量限值以下的照射水平，如同在正常情况下遇到的那样，可以排除非随机性效应。如果用来定义有效剂量当量的那些权重因子 w_T 能够合适地反映出每个器官或组织受照后的相对危害，那么，由于每种效应的危险正比于有关的剂量当量，所以很容易看出危害的随机性部分是和集体有效剂量当量成正比的。

(21) 显然，在涉及到大剂量时，如同在放射治疗或辐射事故中那样，客观健康危害不再正比于集体有效剂量当量。在这些情形下，由于非随机性效应的贡献，要估算客观健康危害就需要知道所有的个人剂量。

(22) 受照射个人的担心和不安有时是理性因素和非理

性因素的混合产物。评价决策时所考虑的是理性因素，它们包括危险水平和对危险的态度（厌恶）。根据委员会在它的建议中所作的假设，危险水平正比于个人的有效剂量当量。然而，对危险的态度不能视为在所有的危险水平下都是正比于危险。事实上，在较高的危险水平下，对危险的厌恶随着危险而增加也许要比按照线性关系更快一些。因此，每个受照的个人对这个危害成分的贡献将是他的有效剂量当量的函数，这一函数不一定是线性的，而且对各个受照射的组不一定相同。

(23) 由于存在着辐射照射而施加的妨碍个人舒适的那些限制，通常是根据个人剂量和现行的国家法规或企业管理规则决定的。这个危害成分也将取决于个人的贡献，各为个人剂量的一个非线性函数。

(24) 在应用多标准方法来制定辐射防护最优化的决策时，危害的一切成分可以分别予以考虑。在代价与利益分析的方法中，对危害指定一个货币价值。考虑到第 15, 16 和 17 段中的讨论，客观健康危害（如果排除掉非随机性效应）可以赋予某一货币价值 αS ，这里 S 是所考虑的辐射装置、源或实践所给出的集体有效剂量当量， α 是决策人指定给单位集体剂量的货币代价，例如指定给人 $\cdot Sv$ 的货币代价。

(25) 其他危害成分总括在一起，将取决于个人剂量。一个受照组中某一个人给出的贡献可以表示为个人剂量的函数 $f(H)$ ，这个函数随厌恶危险的态度和国家或企业的规程而定。函数 $f(H)$ 的形式不一定对所有的受照组都是一样，而且如同一切社会态度那样可以随着时间而改变。这些危害成分的代价可以估算为 $\beta \sum_i N_i f_i(H_i)$ ，这里 H_i 是第 i 组中个人的剂量当量， N_i 是个人的人数， β 是由决策

人指定给这些危害成分每单位的货币代价。

(26) 本报告在讨论辐射防护最优化中的代价利益程序的那些技术性的章节中，危害的代价将表示为 $Y = \alpha S + \beta \sum_i N_i f_i(H_i)$ 。在实际应用代价利益方法时，决策人指定给 α 和 β 的值将取决于对不同危害的相对重要性所作出的价值判断。应当指出，在许多场合下，表达式 $Y = \alpha S$ 将是对危害代价的一个很好的近似，纵使 β 并不是微不足道。假如所有的个人剂量都很小，而且函数 $f_i(H_i)$ 随着剂量的降低而急剧减小，那么上述的近似就能成立。

(27) 辐射防护最优化程序除了考虑辐射危害之外还要考虑其他因素。在代价利益程序中，这些因素可以合并 in 所谓防护的代价之内。企图提高防护水平而作出的努力意味着劳力、时间、材料、甚至危险方面的社会代价。

(28) 估算防护代价有时会变得相当复杂。例如，假如选择某一种防护水平涉及制造和安装某种防护系统，并保证它的运转，那么它的代价一般不仅仅是在这些操作中支出的费用，而且还包括着采购这一系统的原材料和元件所付的费用，以及由社会负担的这些操作所致的危害的代价。然而，通常可以假定所有这些代价已经包括在这一系统的采购、安装和操作的货币代价之内。

(29) 防护代价的货币价值是根据惯用的经济技术估定的，考虑到实际的支出以及它们在时间上的分布。这些技术将在本报告的技术性部分加以讨论，在会计学的文献中有详细的描述。

辐射防护最优化中代价与 利益分析的理论基础

(30) 把代价利益方法应用于决策的制定时，基本的概念是很简单的：如果从某一种可供选择的方案所得的净利益超过下一个最佳方案，则选用前一方案，否则就摒弃不用。在引进包含着辐射照射的某一实践时，对社会的净利益在理想情况下可表示为

$$B = V - (P + X + Y)$$

式中 B 是引进此种实践而获得的净利益， V 是毛利益， P 是除去辐射防护代价以外的全部生产代价， X 是达到所选择的辐射防护水平而花费的代价， Y 是这种辐射防护水平所伴有的危害代价。

(31) 寻找能满足最优化要求的一个值，意味着防护代价与危害代价相互制约（每一方面的代价是防护水平的一个函数），使得

$$X(\omega) + Y(\omega) = \text{最小}$$

其中防护代价和辐射危害代价都是由 ω 代表的防护水平的函数（例如 ω 可以是屏蔽厚度、通风速率以及防护设备的选择，等等）。显然，如果 V 和 P 与 ω 无关，选取一对最优的 X 和 Y 值，将使引进这种实践而得到的净利益达到最大。

(32) 然而，应当指出，在某些场合下改变防护水平会影响实践的毛利益。在这些场合下，最优化程序必须考虑到这些改变以维持净利益达到最大的这个主要目标。例如，在保护病人的最优化程序中，情况也许就是如此。