

ICRP 防护体系的新进展

中国医学科学院放射医学研究所 郑钧正综述 张景源审

提 要: 1991年春发表的国际放射防护委员会(ICRP)第60号出版物,提出了新的放射防护基本建议。这是继1977年第26号出版物之后的又一重要建议书,必将对今后电离辐射防护工作产生较大影响。本文简要评述ICRP放射防护体系的发展变化,扼要介绍新建议书的主要内容。

已有60多年历史的ICRP,是致力于研究电离辐射防护的权威性国际组织^[1, 2]。其技术报告是国际公认的电离辐射防护领域的重要文献,已成为各国制定辐射防护法规、标准和指导防护实践的主要依据^[3]。1977年ICRP发表第26号出版物,提出了不同于以往的剂量限制体系^[4],具有重要的理论和实际意义。13年来,放射医学与防护以及相关学科取得较大进展,人们对电离辐射的认识不断深化,同时在26号报告的实际应用中也出现一些问题,因而ICRP把修订其基本建议提到了议事日程^[5, 6]。经过几年酝酿并数易其稿,ICRP主委员会于1990年11月9日通过了取代第26号出版物的新建议书^[7]。新基本建议以《1990国际放射防护委员会建议书》为题,编为第60号出版物,于1991年正式发表^[8]。

新建议书的发表不仅是放射医学与防护界的重大事情,而且对电离辐射在各领域的广泛应用将产生重要影响。因而必须认真研讨受到世界各国普遍关注的ICRP60号出版物。

一、从“最大容许剂量”到“放射防护三原则”

在充分利用电离辐射造福于人类的同时,如何趋利避害,保护放射工作人员和广大公众及其后代尽可能免受电离辐射的有害影响,是关系到核科学技术发展的重要课题。应运而生的放射医学与防护学科,把研究制定放射防护标准作为重点之一。

早期的放射防护标准侧重于寻求一个理想的区分安全与危险的剂量限值,先后出现了耐受剂量、最大容许剂量等概念。ICRP于1950年按当时的认识,认为不引起机体可以感知的损伤的辐射剂量称为容许剂量,并提出每周0.3rem(即 $15\text{rem}\cdot\text{a}^{-1}$)作为放射工作人员的基本限值^[9]。随着对辐射危害认识的提高,ICRP1959年发表的第1号出版物把职业性照射的最大容许剂量当量降为 $5\text{rem}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[10]。第1号出版物首先被1964年发表的第6号出版物取代^[11],后来又被1966年发表的第9号出版物所取代^[12]。但这两次更迭只是对第1号出版物提出的基本建议作补充和修改,无实质上的重大改变。

1977年,ICRP发表了著名的第26号出版物^[4],淘汰了沿用近30年的最大容许剂量等概念。提出以辐射实践的正当化、放射防护的最优化和个人剂量限值等防护三原则构成的剂量限制体系作为防护基本原则。1982年,国际原子能机构、世界卫生组织、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构在ICRP26号报告的基础上,联合发布《辐射防护基本安全标准》^[13]。80年代世界各国普遍采纳了26号报告的建议,我国也重新修订发布了新的国家标准《放射卫生防护基本标准》(GB4792-84)^[14]和《辐射防护规定》(GB8703-88)^[15]。

从最大容许剂量到放射防护三原则,反映了电离辐射防护指导思想的飞跃。在考虑了经济和社会因素后,应将一切照射保持在可以合理达到的尽可能低水平(ALARA原

则)。防护三原则中还要求必须保证个人所受的剂量当量不超过规定的相应限值。26号报告对各种情况规定的相应个人剂量限值是**不可接受的剂量范围的下限,而不应理解为可以允许接受的剂量上限。个人剂量限值不能作为达到满意防护的标准或设计指标,只能理解为以最优化原则控制照射的一种约束条件。

二、ICRP1977年建议书面临的问题

已经产生重要影响的 ICRP1977 年建议书是辐射防护发展史上一个重要的里程碑,但26号报告提出的基本建议并不是突然产生的。如1966年发表的9号报告已提出“可以接受的危险”等概念^[12],而26号报告本身同样需不断完善。1978年,ICRP 斯德哥尔摩会议声明就对1977年建议书进行若干条文的澄清及修订^[16]。类似的局部修改和补充在以后的 ICRP 专题报告和会议声明中还继续进行^[18~20]。

自从26号报告问世以来,放射医学与防护学科及相关学科取得许多进展,例如辐射致癌的流行病学调查和整体、细胞、分子水平上的实验研究均积累了新的数据。尤其是对日本广岛、长崎9万余名原爆幸存者的观察研究,随访至1985年,发现各种实体癌的发生例数从1974年的110例增加至260例。广岛、长崎原爆辐射剂量的重新估算,用1986年剂量测量体系(DS86)取代1965年暂定剂量(T65D),也使得癌症死亡概率增加了^[8]。因此,联合国原子辐射效应科学委员会、美国电离辐射生物效应科学委员会对辐射致癌危险有了新的估计。表1对比了新、旧估计及采用不同危险预测模型的结果^[8]。由此对辐射危害的评估产生了较大影响,比26号报告关于致死性癌危险度 $1.25 \times 10^{-2} \text{Sv}^{-1}$ 这个估计值高数倍。

随着核能事业的发展,目前全世界已有27个国家的400多座核反应堆在运行,还有

表1 归因于低LET全身急性均匀照射1Gy的终生超额癌症死亡率(日本人群)

估计值来源		死亡率(10 ⁻²)	
		相加预测模型	相乘预测模型
BEIR I	1972	1.2	6.2
BEIR II	1980	0.8~2.5	2.3~5.0
BEIR V	1990	—	8.85 ^c
UNSCEAR	1977	2.5	—
UNSCEAR	1988	4.0 ^a ~5.0 ^b	7.0 ^b ~11.0 ^a

a.根据年龄不同的概率系数推算; b.根据年龄平均恒定的概率系数推算; c.美国人群,受高剂量照射,采用修正的相乘模型

100余座在建造中,辐射防护成了社会各界普遍关注的问题。1986年,苏联切尔诺贝利核电站的严重事故,一度使人们对辐射危害的认识产生不良影响。尽管ICRP1985年巴黎会议声明^[20],已将公众主要限值降为1mSv,但仍受到要求降低限值的压力。综合各种不同看法,不能不认真审议整个防护体系。

同时,26号报告提出的基本建议,在这些年实际应用中虽陆续进行了一些局部修改和补充,但仍存在一些问题。如危险度估计和剂量限值选择中,1977年建议书只考虑致死性癌和计及第一、二代的遗传危害;组织权重因子 W_T 的确定过于简化;职业性照射限值采用把限值水平的照射可能引起的危险同被认为是安全行业的事故死亡率相比较而得出,这样只考虑致死危险因素欠全面,又用同一安全标准苛求差别很大的不同行业也不尽合理,且难顾及不同历史时期和不同国家地区的差异等。基于上述缘由,ICRP更新了其基本建议。

三、ICRP新建议书梗概

60号报告反映了ICRP防护体系的新进展。此新建议书的特点是把新近的放射生物学资料和当前放射防护的发展考虑进去;改进了建议书表达方式;同时注意到在与新资料一致的前提下,尽量保持其基本建议的稳定

定性。

新建议书除序言外分 7 章，然后接一章建议书摘要，并有 4 个内容丰富的附录。依然保持 ICRP 报告分段叙述的风格。

第 1 章引言。概述 ICRP 历史及其基本建议的发展，说明新建议的宗旨等。

第 2 章放射防护中使用的量。

第 3 章放射防护的生物学方面。此章是放射生物学基础的精炼阐述。介绍电离辐射的生物效应、危害 (detriment) 的概念和辐射照射后果的定量估计等。

第 4 章放射防护的概念结构 (Conceptual framework)。介绍新基本建议的框架，概述放射防护体系，讨论实践与干预的防护原则，以及防护体系效果的评估。

第 5 章计划性和延续性实践的防护体系。阐述职业性照射、医疗照射和公众照射的防护体系，以及潜在照射的防护原则，并讨论各类照射相关的问题。

第 6 章干预中的防护体系。介绍公众照射的干预基础，可能需要采取补救行动的情况，以及事故和应急。

第 7 章委员会建议书的执行。阐述实施基本建议的有关职责、制定规章和管理的要求、剂量评价、应急计划和豁免等。

新建议书正文还有一章摘要。分 12 节概括新建议书基本内容。

附录 A 放射防护中使用的量。详细给出涉及到的 18 个量的定义等。

附录 B 电离辐射的生物效应。

附录 C 判断辐射效应意义的基础。附录 B 与 C 是正文第 3 章的展开说明和有关辐射危险评估的背景资料。

附录 D 委员会出版物目录。收列 ICRP 自 1928 年至 1989 年公开发表的 100 条文献目录。

四、有关放射防护量和概念的新建议

ICRP 在其发展防护体系的新建议书

中，努力理顺所使用的有关放射防护的量，并引入一些新概念。

1. 基本剂量学量

新建议书使用吸收剂量 D 、当量剂量 H_T 和有效剂量 E 作为基本剂量学的量。

在新建议书中，吸收剂量主要是指对一个组织或器官的平均值。器官吸收剂量 D_T 是辐射授予质量为 m_T 的器官或组织的总能量 ϵ_T 与 m_T 的比值，即 $D_T = \epsilon_T / m_T$ 。其单位是 $J \cdot kg^{-1}$ ，在 SI 制中专有名称为戈瑞 (Gy)。

当量剂量 (Equivalent dose) H_T 是吸收剂量与辐射权重因子 (Radiation weighting factor) W_R 的乘积，即 $H_{T,R} = W_R \cdot D_{T,R}$ 。下角标 R 表示 R 种辐射引起的。当辐射有多种类型和能量时，可以表达为 $H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R}$ 。 H_T 单位是 $J \cdot kg^{-1}$ ，在 SI 制中专有名称为希沃特 (Sv)。

当量剂量不只是过去剂量当量的改变名称，还有概念上的差别。过去剂量当量是点量，相应的吸收剂量也是点量，加权因子用辐射场特性决定的品质因子 Q ；而当量剂量来自器官平均剂量，加权因子 W_R 是低剂量诱发随机效应的相对生物学效应系数 RBE 的代表，它根据 RBE 选定，与射线的种类和能量有关。表 2 是 ICRP 确定的 W_R 值。

表 2 辐射权重因子 (W_R)

辐射类型	能量范围	W_R
光子	所有能量	1
电子和介子	所有能量	1
中子	小于 100 keV	5
	100 keV 至 100 keV	10
	大于 100 keV 至 2 MeV	20
	大于 2 MeV 至 20 MeV	10
	大于 20 MeV	5
质子 (反冲质子除外)	大于 2 MeV	5
α 粒子, 裂变产物, 重核		20

新建议书还把过去有效剂量当量也相应改称为有效剂量 (Effective dose) E 。 E

是 H_T 与组织权重因子 (Tissue weighting factor) W_T 的乘积, 并对所有器官或组织求和, 即 $E = \sum_T W_T H_T$ 。E 的单位与 H_T 一样。显然可以推导出: $E = \sum_T W_T \sum_R W_R D_{T,R}$ 。

W_T 是组织 T 的随机性效应危险系数与全身均匀照射时的总危险系数之比。由于新建议书考虑的是复合概念的危害, 有关随机性效应危险系数的概念和数值均不同于过去, 所以 W_T 数值也相应改变了。新建议书的 W_T 按器官和组织分成 4 组分配 (见表 3), 所涉及的器官和组织更多了。如其余组织中某一组织可能接受较大剂量照射, 则该组织 W_T 值可取 0.025, 而另一半分配给其他组织。

表3 组织权重因子 (W_T)

器官或组织	每一组织 W_T	该组组织总权重
一组: 性腺	0.20	0.20
二组: 红骨髓、结肠、肺、胃	0.12	0.48
三组: 膀胱、乳腺、肝、食道、甲状腺、其余组织	0.05	0.30
四组: 骨表面、皮肤	0.01	0.02

2. 辅助剂量学量 (Subsidiary dosimetric quantities)

由基本剂量学量可以派生出针对表征摄入放射性核素的待积当量剂量 $H_T(\tau)$ 和待积有效剂量 $E(\tau)$ 。 τ 为积分时间, 对放射工作人员取 50 年, 对公众积分至 70 年。

同理对群体可有集体当量剂量 S_T 和集体有效剂量 S , 是该群体所有受照个人在全部受照射时间内的积分值。

作为计算工具, 还可以使用剂量负担 (Dose commitment) $H_{C,T}(\tau)$ 或 $E_C(\tau)$ 。

3. 实用量 (Operational quantities)

当量剂量和有效剂量都不能直接测量, 只能通过一定模式推导。新建议书原则上采纳国际辐射单位与测量委员会 (ICRU) 在

其 39 号报告中提出的 4 个实用量: 用于环境监测的周围剂量当量 $H^*(d)$ 和定向剂量当量 $H'(d)$; 用于个人监测的深部个人剂量当量 $H_P(d)$ 和浅表个人剂量当量 $H_S(d)$ [21]。但有待于进一步落实。

4. 辐射效应分类

新建议书把辐射效应按发生机制区分为随机性效应和决定性效应 (Deterministic effect)。26 号报告把有剂量阈值其严重程度随剂量变化的效应称为非随机性效应。但这类效应的单个细胞死亡是随机性的, 当照射剂量足够大, 决定了杀伤过多细胞而综合表现出临床可见的效应。照射剂量高到一定水平, 产生危害的概率急剧增加至 100%。ICRP 把此类效应改称为决定性效应。新建议书对随机性效应表现在辐射诱发癌和遗传效应的作用机制有了进一步的阐述。

5. 实践 (Practice) 与干预 (Intervention)

新建议书把导致增加照射剂量的各种人类活动称为实践, 例如引入新的源项、增加辐射照射途径和人员、改变人与辐射源关系等。反之, 导致减少辐射照射剂量的人类活动称为干预。针对二者的防护原则是有区别的。

6. 概率和概率系数 (Probability coefficients)

鉴于危险一词有多种含义, 为避免混淆, 新建议书把 26 号报告使用的危险和危险度相应改称概率 (Probability) 和概率系数。即辐射效应发生的概率直接称为概率, 单位剂量的概率称为概率系数或危险系数。

新建议书在辐射危险评估中, 用概率来表示辐射效应 (如致死性癌、非致死性癌、严重遗传损伤等) 发生的概率, 用后果 (consequence) 来表示辐射效应的严重程度及其时相分布, 用后果的数学期望值来表示效应的平均后果。

7. 剂量和剂量率效应因子 (Dose and

dose rate effectiveness factors, DDREF)

通常放射防护领域主要考虑小剂量和低剂量率的照射。作为估计随机性效应概率系数主要依据的辐射流行病学研究数据,往往来自大剂量和高剂量率的结果,因此必须引入剂量和剂量率效应因子(DDREF)进行校正。根据已有流行病学调查资料和实验研究分析,在低传能线密度(LET)照射情况下,ICRP建议DDREF简单地取值为2。当然待进一步积累更多研究资料后,可望提高选取DDREF的准确性。

五、放射防护体系

60号报告提出的放射防护体系是以放射防护三原则为基础的进一步充实和发展。

在评价放射防护效果时,新建议书区分两类相关,即源相关和人相关;区分两类活动,即实践和干预;按照射的存在形式区分三类照射:计划性和延续性实践的照射、既存的照射、潜在的照射;按受照对象又可区分职业性照射、医疗照射和公众照射等三类照射。以上各种区分存在着相互交错,在应用放射防护体系时必须具体分析,区别对待。

从总体而言,在实践中的防护原则即①实践的正当化:对任一实践,应使其带来的利益大于放射危害;②防护最优化:对任一源项,包括考虑经济和社会因素在内,产生的照射应保持在可以合理做到的最低水平;③个人剂量限值:所有实践带来的个人照射剂量必须低于剂量限值。计划性和延续性实践必须遵守防护三原则。

新建议书强调职业性照射防护最优化的要点是确定源相关的剂量约束(Dose constraints),以更好限制个人受到的剂量。建立剂量约束有利于解决防护最优化引起的获利与受害在社会中的分配不公(inequity)问题,并控制可能从多个实践受到照射的人所需的限值。

新建议书关于医疗照射防护体系,增加

了在最优化分析中,考虑由相应专业机构或管理机构对某些一般诊断程序选择使用剂量约束或调查水平等。

潜在照射是指有造成照射的可能但不一定会发生的照射,如放射事故。潜在照射需要作为实践的一部分加以考虑,既要考虑可能产生的剂量,也要考虑可能产生的危害。对潜在照射不能直接使用剂量限值,因为潜在照射的发生概率及后果是不能确定的,只能进行推测。一方面防止其发生,另一方面当真出现时,又要导致干预行动限制和降低照射,减轻其后果。

当考虑控制既存照射的实践时,源和接受照射的人业已存在,如住所中的氡等天然辐射照射,只能实施干预的防护体系。

新建议书关于干预的防护原则是考虑干预的正当性和进行最优化分析。拟议中的干预应该使降低剂量和减少危害足以超过干预的代价。干预不能应用剂量限值,但从干预的正当性判断和最优化分析可导出适用于一定情况下的干预水平,供决定是否采取有关补救措施。

新建议书强调引起照射的实践,与事故或既存的照射要求对补救行动作出决策的情况之间的区别,这类决策在依据行动所能达到的降低照射的程度而确定。

六、剂量限值问题

ICRP在新建议书中继续保持并充实其放射防护体系。鉴于委员会认为根据已获得的新数据表明辐射危害的概率系数增高了,因而决定在新建议书中降低职业性照射的个人剂量限值。这是一项重要的变动,表4列出新建议的职业性照射和公众照射的个人剂量限值。

本文第二部分已经述及这个变动的一些因素(参见表1)。新建议对辐射危害的评估不同于过去,不仅计及致死性癌,而且考虑非致死性癌和严重遗传损害等。表5是新

表 4 新建议的剂量限值

项 目	剂 量 限 值	
	放射工作人员	公 众
有效剂量	每年20mSv (可在规定的5年内平均,但任何一年不得超过50mSv)	每年1mSv (在特殊情况下允许5年内平均)
年当量剂量		
眼晶体	150mSv	15mSv
皮 肤	500mSv	50mSv
手和脚	500mSv	—

注:表中所列限值用于在规定期间内所接受的外照射剂量与同期摄入所致50年待积剂量(对儿童到70岁)之和。

表 5 随机效应的额定概率系数

受照人员	危 害 ($\times 10^{-2}\text{Sv}^{-1}$)			
	致死癌	非致死癌	严重遗传效应	总计
成年工作人员	4.0	0.8	0.8	5.6
整个人群	5.0	1.0	1.3	7.3

建议的随机性效应额定概率系统。同26号报告估计的全部随机性效应危险度最大值 $1.65 \times 10^{-2}\text{Sv}^{-1}$ 相比,高3倍以上。所以导致ICRP降低剂量限值。

新建议书在对照射引起的危害进行定量评价时,采用多属性分析方法,综合各方面因素提出3个水平:不可接受的,即任何情况下都不应接受;可耐受的,即不希望接受但是从道理上讲可以耐受;可接受的,即不需进一步改善即可被接受。新建议主张把剂量限值置于不可接受与可耐受水平的交界处。

为了给剂量限值的选取提供定量基础,对职业性照射,ICRP计算了从18~65岁每年分别接受10、20、30和50mSv照射产生的后果。对公众成员也用类似方法考虑。这样,根据需要与可能确定出表4规定的剂量限值作为防护体系的组成部分。

必须指出,剂量限值只是放射防护体系的一部分,整个防护体系旨在把有正当理由的照射控制在可以合理达到的最低水平。因此剂量限值不仅根本不是区分安全与危险的分界线,而且也不是满意防护的目标。自从强调在考虑经济和社会因素条件下应使照射保持在可以合理达到的最低水平后,已经明显出现个人剂量下降的趋势,这使得剂量限值在整个防护体系中的重要性降低了。

七、结 语

回顾ICRP历次关于放射防护基本建议的问世,都对辐射防护事业作出重要贡献。这次新建议也不例外。但放射防护基本原则的确立取决于多方面复杂因素,尤其是辐射危害评估仍有许多不确定性,新建议肯定需要今后进一步不断完善。正如新建议书引言中所重申的,ICRP只提供基本原则的指导,而不是管理条文。紧密结合我国实际,消化吸收新建议精神是我国放射防护工作者面临的重要任务。

参 考 文 献

1. Lindell B; The ICRP. Journal of the Institution of Nuclear Engineers 1980, 21:50
2. Sowby FD; Radiation Protection and the ICRP. Radiation Protection Dosimetry 1981, 1:237
3. 郑钧正; 国际放射防护委员会的出版物 职业医学 1983, 10(6):48
4. ICRP(李树德译); 第26号出版物 国际放射防护委员会建议书 原子能出版社, 1978
5. ICRP; Statement from the 1987 Como Meeting of the ICRP. Annals of the ICRP 1987, 17(4)
6. ICRP; Statement from the 1989 Paris Meeting of the ICRP. Annals of the ICRP 1989, 20(1)
7. ICRP(李德平译); 国际放射防护委员会新闻发布 中华放射医学与防护杂志 1991, 11:66

8. ICRP; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60. Annals of the ICRP 1991, 21(1~3)
9. ICRP; International Recommendations on Radiological Protection. Radiology 1951, 56:431
10. ICRP; Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 1. Oxford, Pergamon Press, 1959
11. ICRP; Recommendations of the ICRP, ICRP Publication 6. Oxford, Pergamon Press, 1964
12. ICRP (刘增鼎译): 第9号出版物, 国际放射防护委员会建议书 原子能出版社, 1975
13. IAEA; Basic Safety Standards for Radiation Protection, Safety Series No.9.1982
14. 中华人民共和国卫生部: 放射卫生防护标准, GB4792-84 中国标准出版社, 1986
15. 国家环境保护局: 辐射防护规定 GB8703-88 中国标准出版社, 1989
16. ICRP; Statement from the 1978 Stockholm Meeting of the ICRP. Annals of the ICRP 1978, 2(1)
18. ICRP; Statement and Recommendations of the 1980 Brighton Meeting of the ICRP. Annals of the ICRP 1980, 4(3~4)
19. ICRP; Statement from the 1983 Washington Meeting of the ICRP. Annals of the ICRP 1984, 14(1)
20. ICRP; Statement from the 1985 Paris Meeting of the ICRP. Annals of the ICRP 1985, 15(3)
21. ICRU; Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources ICRU Report 39.1985

(上接第204页)

季刊); IAEA公报(介绍国际核进展和机构计划的季刊); IAEA年报以及IAEA新闻特写等。

1984年,我国正式参加了IAEA。其后,作为一个发展中国家,积极参加了IAEA所组织的各项活动,发挥了我国的积极作用。IAEA通过它在技术援助、人员培训和情报服务等方面对我国核科学和技术的发展,特别是辐射防护、核医学,国际协调、组织国际比对,安全防护的国际一致原则的实现都起到了重大作用。今后进一步发挥这些作用,无疑对我国在这些领域的现代化是

十分重要的。

参 考 文 献

1. IAEA; IAEA Bulletin 1990, 32(4):48
2. IAEA; IAEA Bulletin 1990, 32(1):62
3. IAEA; Facts about the IAEA, Division of Public Information, IAEA, 1988, P.32~35
4. IAEA; IAEA Highlights of Activities, IAEA/PI/A22E 89-03534, 1989
5. Parr RM; Paper Presented at the Seventh International Symposium on Trace Elements in Man and Animals, Dubrovnik, Yugoslavia, 20~25 May 1990
6. IAEA; IAEA Bulletin 1990, 32(4):43