



国际放射防护委员会第10号出版物

职业照射体内污染 辐射剂量的估算

原子能出版社

国际放射防护委员会第10号出版物

职业照射体内污染辐射
剂量的估算
(1968)

肇恒元 董柳灿 译 果 行 校

原子能出版社

内 容 简 介

本书介绍了现有的关于放射性核素代谢的知识和这种代谢在数学上的描述、监测的方法和程序以及评价内照射的定量规范。

本书载有附录 C, 包括大约 30 种在工作人员体内污染中最常遇到的放射性核素代谢的详细数据。也介绍了计算调查水平的数据和方法。

本书可供从事辐射防护、放射医学和放射生物学等有关方面的工作人员及科学研究工作者参考。

**Report of Committee IV
on
Evaluation of Radiation Doses
to Body Tissues from Internal
Contamination due to Occupational
Exposure
(1968)**

职业照射体内污染辐射剂量的估算

肇恒元 董柳灿译 果 行校

原子能出版社出版

冶金印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

(只限国内发行)

☆

开本 850×1168¹/₃₂·印张 4⁵/₁₆·字数 155 千字

1975 年 3 月北京第一版·1975 年 6 月北京第一次印刷

印数 001—5600 ·定价: 0.60 元

统一书号: 15175·031

2676/29

前 言

在 1964 年 1 月，国际放射防护委员会任命了一个专题小组，其任务是研究并报告关于职业性照射下的体内污染的估算。这个小组在从事工作的时候，把自己的课题看作是国际放射防护委员会第 6 号出版物第 86 段的扩充。这一段的原文是：

“开放型放射性同位素有可能被食入或吸入而造成超过最大容许浓度的照射水平时，对于操作此种放射性同位素的职工应该进行检查，以估计其全身积存量。放射性同位素有可能通过皮肤或通过皮肤的裂口和伤口而进入人体时，也应该进行此种检查。检查的方法，或者测量其呼出的气体和排泄物，或者用全身辐射监测仪直接测量其体内的含量，随具体情况而定。有关的器官或组织所受的辐射剂量用计算方法求出，并记载在个人的记录中。根据‘内部’剂量的多寡，调整其可以容许的外照射剂量。”

目 录

前 言

1. 引言	1
2. 放射性核素的代谢	3
放射性核素进入体内的途径	4
移位和沉积	7
排除	8
3. 监测方法和程序	9
监测方法	9
监测程序	15
4. 辐射剂量的计算	18
5. 需要进行调查的情况	23
调查水平	24
导出调查水平	25
后继的调查	29
参考文献	31
附录 A: ICRP 第 2 号和第 6 号出版物的代谢数据表	34
附录 B: 放射性核素滞留量的数学公式	37
附录 C: 关于单个放射性核素的数据	42

1. 引言

(1) 要估算工作人员的体内污染的关键器官所受到的总辐射剂量,就需要知道器官污染的时间经过,特别是它的时间积分,这个积分可以用微居里·天表示。ICRP 第2号出版物^[2]提出了一个代谢模型和标准人的若干体格特征,利用这些资料,可以从测量所得的体内或其排泄物中的放射性核素来计算上述的时间积分。根据标准人特性所估算的放射性核素的体内含量和辐射剂量只能作为某一次摄入所引起的真实值的一个近似,但这种粗略估计在下面情况中是需要的:

- (i) 规划操作的安全及其所需的封闭性;
- (ii) 评价公共环境的安全;
- (iii) 指明照射量太低因而无需进一步关注,或者照射量足够高以致需要更精确的估算。

在所有这些情况下,必须照顾到个体和标准人之间的差异。在采用这一模型时,切不可忘记它原拟用于计算一个平均的工作人员五十年内慢性低水平照射的最大容许每天摄入量和最大容许浓度的。因此,假如用于计算急性单次摄入所导致的排泄量或者计算不同于标准人的个别人的排泄量,这个模型就必须做相当大的修正和补充。

(2) 有两个理论模型可用于计算工作人员由于放射性核素进入体内而受到的辐射剂量。其中之一涉及恒定水平下的每天照射量,ICRP 第2号和第6号出版物对此给出了指导,在文章中列出了空气中和水中的最大容许浓度值。与此不同的另一模型是以放射性核素的单次短期摄入为根据,此模型便是第4专门委员会现在这份报告的内容。在许多实际情况下发生反复的短期照射,要处理这种情况,必须对本报告的理想的方法作出某些修正。

(3) 这个出版物涉及现有的关于放射性核素代谢的知识以及这种代谢在数学上的描述, 涉及监测的方法和程序, 涉及评价内照射的定量规准。报告载有附录 C, 它包括约 30 种放射性核素的代谢的详细数据, 这些核素是在工作人员体内污染中最常遇到的。除了 Te^{132} , Ce^{144} , 和 Np^{239} 属于动物实验的新数据之外, 对所有这些放射性核素介绍了新的(自 ICRP 第 2 号出版物发表以来)从人体研究得来的数据。附录 C 也介绍了计算调查水平(见第 5 章)的数据和方法, 这种调查水平是用于评价体内污染的重要程度的。

2. 放射性核素的代谢

(4) 为了估算由于放射性核素进入体内, 身体及其组成部分所受的辐射剂量, 了解放射性核素及其化合物的代谢是必要的。这对于解释人体放射性的测量数据和排泄物的分析结果特别重要。这一章的目的是综述目前所能得到的代谢方面的有关资料。

(5) 放射性核素的所谓“可溶性”和“不可溶性”化合物在代谢方式上是迥然不同的, 因而在一开始就必须认识和定义这两种类型的行为。通常在化学和物理学上定义的水溶液中的溶解度, 在许多情况下不适合于预示放射性核素从某一部位(肠道、肺、伤口)转移到细胞外体液并且从那里转移到体内其他器官或组织。例如:

吸入不可溶性氧化铀之后在 24 小时内就有铀随尿排泄^[4];

吸入含有 I^{131} 的不可溶性 AgI 之后在甲状腺中迅速出现 I^{131} (文献[5]的 35 页);

食入含有 Ce^{144} 的易溶性 $CeCl_3$ 之后, Ce^{144} 在肠道中几乎不被吸收($f_1 < 10^{-4}$)^[2]。

(6) 因此, 本委员会认为不宜用“可溶性”一词去描述放射性核素化合物所具有的能使它通过身体内的隔膜迅速转移的那种特性。在本报告中“可转移性”一词来表达这个意思。从一个部位到另一部位(但不一定在相反方向)可转移的程度依赖于化合物的物理和化学特性, 依赖于它同体细胞和体液的反应, 而且还依赖于如像吞噬作用之类的生物过程。化合物的可转移性可以有各种不同的程度, 某些化合物能够迅速完全地通过分隔着身体外部和身体内部的第一个膜, 而另有一些化合物则通过得很慢很少。

因此, “可转移性”和它的反义“不可转移性”这两个词的应用, 不应该看作意味着可以把放射性化合物简单地分成两种截然可分的类别。本报告中所用的“可转移性”一词相当于 ICRP 肺动力学

专题小组^[6]在类似的意义上所用的“可清除”一词。

(7) 图 1 用图解概述了在体内沾污中必须考虑的最重要的代谢途径。在继续进行讨论这些途径之前必须指出: 留存在肠管、膀胱、肺部通气道、或皮肤表层的放射性核素还没有参与人体的代谢过程。一旦它们从这些部位被吸收到细胞外体液或淋巴结之中, 它们才构成全身沾污。

放射性核素进入体内的途径

(8) 在讨论这个问题时必须要有正规的术语。在可能范围内下面的词将在如下的意义上使用:

摄入量, 进入鼻或口的量。

吸收量, 被吸收到细胞外体液中的量。

沉积量, 存在于所考虑的器官中的量(见 17 段)。

(9) 放射性核素可以经由吸入, 食入或通过完好的皮肤或皮肤伤口进入体内。

吸 入

(10) 放射性气体, 液体或固体可以通过吸入而进入体内。水溶性的气体, 例如含有氧化氚或放射性碘的气体很快地从吸入的空气中被吸收, 并在几秒钟内就出现在细胞外体液中。以气溶胶形式被吸入的液体或固体放射性化合物可以有多种可能的归宿, 取决于它们的物理化学特性。吸入的一部分将沉积在气管和支气管中, 而剩余的部分则被呼出。沉积在上呼吸道部分可通过纤毛运动被逐出而进入胃肠道, 而沉积在肺脏深部的部分, 假如它是可转移性物质, 就可能完全而又迅速地被吸收。如果是不可转移性物质, 它将以较慢的速率部分地被排除和吸收。来自肺脏深部的不可转移性粒子的清除过程还不完全了解, 但随情况的不同变化很大。部分的原因是由于吸入物质的可转移性与许多因素有关, 如粒子的大小或形状、个体的身材和生理情况、以及放射性化合物的化学性质和反应。这些因素的影响在文献[5—9]中有详细的讨论。为了实用的目的, ICRP 第 2 专门委员会(文献[2]表 10)采用

了如下的模型:

标准人呼吸道中的粒子

在肺中粒状物质的滞留依赖于许多因素,如粒子的大小,形状和密度,化学形式,以及这人是否用口呼吸;但当缺乏特殊数据时,可假定其分布如下:

	易溶化合物(%)	其他化合物(%)
呼出	25	25
沉积在上呼吸道随后吞入	50	50
沉积在肺中(下呼吸道)	25 (被吸收入体内)	25*

* 其中一半在最初 24 小时内从肺排出而被吞下,使吞入的总量占 62.5%。其余的 12.5% 以 120 天的半衰期滞留在肺中,这一部分可假定为被吸收到体液中去。

ICRP 第 2 专门委员会的专题小组^[6]已考虑对此模型作出修正。

(11) 此表表明可转移性化合物在吸入以后,或者直接由肺进

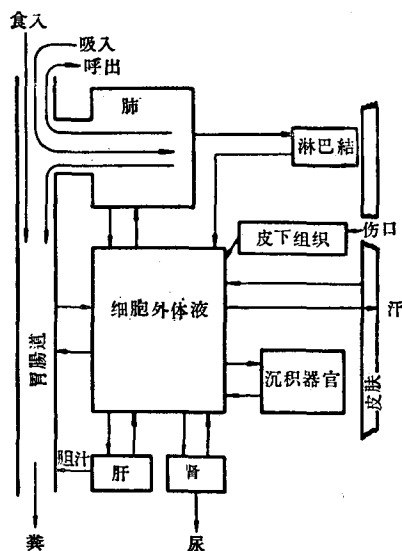


图 1 放射性核素在体内的主要代谢途径

入细胞外体液,或者从气管、支气管排出而被吞入以后从胃肠道进入细胞外体液。另一方面,不可转移性化合物不容易进入细胞外体液;在上述模型中,其中 62.5% 进入胃肠道,随后部分地被吸收或排泄,而 12.5% 长期滞留在肺泡中。沉积在肺泡中的物质可能有一部分转移到肺淋巴结^[5]并长期滞留在那里。应该注意,很少化合物在体液中是完全不可转移的,并可预料在吸入不可转移性化合物之后,在大多数情况下总有一部分在尿中排泄,虽然排泄量往往很少,而且和体内含量不可能有定量的关系。

食 入

(12) 当工作人员食入放射性物质时,他常常在一个短时间内食入,这对肠道构成单次摄入。虽然他可能有一系列的这种摄入,但为讨论简单起见,最好只考虑单次摄入所引起的结果。

(13) 如果物质是不可转移性的,其中大部分将通过胃肠道随粪排出。在缺乏受污染的个体的详细的代谢数据时,可以应用 ICRP 第 2 号出版物中的表 11 来估算胃肠道各部分中的浓度和滞留时间。然而已有一些证据表明这个模型可能需要修正^[10,11,14]。

(14) 如果物质是可转移性的,很大一部分主要是通过小肠被吸收到细胞外体液(在标准人中经历 4 小时)。ICRP 第 2 号出版物的表 12 列出了 f_1 值,这是放射性核素从胃肠道被吸收到细胞外体液中去分数。这些 f_1 值也列在本报告附录 A 的表 1 中,其中包括 24 种元素的化合物。应该记住,该表对每种元素只列出一个 f_1 值,它仅仅指明在计算饮水中最大容许浓度时所假定的可转移性的程度。因此 ICRP 第 2 号出版物中所用的值只不过按照“可溶性”一词的含意指出通过肠粘膜转移的程度。在具体情况中, f_1 值的实际值将依赖于个人的代谢和营养,以及被食入的放射性核素的化合物形式。其他关于胃肠道的行为将在第 3 章论述粪中排泄时(39—41 段)加以讨论。

通过皮肤吸收

(15) 完好的皮肤对大部分放射性物质提供了有效的屏障,不使其进入体内。在实际工作中有重要意义的例外是下列物质,这

些物质能通过完好的皮肤而被吸收:

液态或蒸汽态的氧化氟;

碘蒸汽或碘溶液和碘化物溶液^[13]。

通过伤口进入

(16) 当皮肤裂开, 刺伤或擦伤时, 放射性物质可穿透到皮下组织然后被吸收到细胞外体液中去, 此时可转移性化合物吸收得很快, 不可转移性化合物吸收得很慢。在后一情况, 假如没有对伤口进行去污, 全身沾污的时间进程类似于慢性照射所引起的结果。

移位和沉积

(17) 细胞外体液是可转移性化合物由身体的一部分转移到另一部分的主要媒介物。其他转移方式的两种例子是不溶性的氧化钚从肺转移到淋巴结以及放射性核素或其化合物附着于红血细胞。在细胞外体液中的放射性核素有一部分将通过肾、肝、肠、皮肤或肺排出, 其余部分将沉积在这种核素对之有特殊亲和力的任何器官或组织中。由可转移性放射性核素引起的全身污染发生后不久, 将有一个进入沉积器官的净转移。这种净转移一直继续到细胞外体液中的浓度(由于排泄和沉积)降落到这样低的水平, 以致引起放射性核素由沉积器官回到细胞外体液中去的逆向的净转移。这时, 在关键器官中的数量达到了最大值, 这个最大“沉积量”用于计算辐射剂量(见 62 段)。在双分区系统中这种行为的模型已由齐尔佛斯密特(Zilversmit)等^[14,15]描述。有少数实际中重要的放射性物质如氟的氧化物, 氯化物和钋的化合物并不显著地集聚在任何组织中, 它们在细胞外体液中的浓度在比较长的时期内显示一简单的指数式下降(见附录 C 中关于这些核素的部分)。

(18) 文献[2]的表 12(和附录 A 的表 1)中载有 f_2 的值, 这是放射性核素从血液(或细胞外体液)转移到所考虑的器官(沉积器官)的分数。 f_2 值不适用于单次照射后的短时期, 也不适用于在沉积期间发生显著衰变的很短寿命的放射性核素。属于这一类的例子是甲状腺吸收 I^{132} , I^{133} , I^{134} 和 I^{135} 。

(19) 其他分数是:

f_2 , 关键器官中的量占全身量的分数,

f_a , 关键器官中的量占吸入量的分数,

和

f_w , 关键器官中的量占食入量的分数, 这些分数也在文献[2]和附录A的表1中给出。

排 除

(20) 由所有途径总合引起的某一全身污染物的排除速率, 随着它在细胞外体液中的浓度而变化。排除率随时间的变化将在第4章描述并用数学公式表示。生物检验程序就是要测量出在污染后各个时刻的排除速率, 并由此计算体内留存量, 而且当可能的时候, 计算各个器官中的留存量, 直到放射性核素在体内消失为止。

(21) 图1说明排除的途径有呼出、汗、尿和粪。

(22) 呼出对如下情况是重要的排除途径:

(a) 吸入的气溶胶中未被沉积的部分,

(b) 来自细胞外体液的氧化氟蒸汽,

(c) 体内沉积的钷和镅的放射性衰变所产生的钷射气和氦,

(d) 放射性二氧化碳。

(23) 汗液一般将包含存在于细胞外体液中的任何放射性核素; 对氧化氟而言, 汗液中和细胞外体液中的浓度是同样的。

(24) 在尿中排除的放射性核素只能来自细胞外体液。某些放射性核素在排泄过程中可以对肾产生足够的照射, 从而使肾成为关键器官。

(25) 由图1可见, 粪中的放射性核素可以来自食入或吸入的不可转移性放射性化合物, 也可以来自直接进入胃肠道或通过胆汁而进入胃肠道的可转移性放射性核素。

(26) 各种排泄物的分析作为生物检验程序的一部分, 将在第3章中讨论。

3. 监测方法和程序

(27) 在本报告中, 监测一词的含意是指获取关于污染事件的资料, 收集样品以供分析, 测量在这些样品中和全身中的放射性, 以及评价这些资料, 将其表示为体内放射性核素的含量和对关键器官的辐射剂量。

(28) 在使用非密封放射源的工作中, 所采取的辐射防护措施包括测量工作场所的表面污染或气载放射性, 借此以检查工作者的环境; 或者分析他的排泄物或测量他的体内放射性, 借此以检查工作者本身。本章只是简短地评论这些方法, 但不包括专用的或详细的实施方法, 因为这些方法在最近发表的一些文献中已有充分的论述^[16-20]。

监测方法

(a) 表面污染

(29) 测量在工作区域内暴露的表面上容易去掉的放射性核素, 对于评价操作条件是有用的, 但只能非常间接地衡量潜在的照射。在监测程序中这种监测的地位已在文献[21]和[22]中讨论。放射性气体如象氧化氙蒸汽和含有 $I^{131[23]}$ 的碘甲烷并不沉积在暴露的表面上, 因此测量表面污染不能揭示出空气中这种污染物的存在。对于放射性气溶胶, 没有表面污染可以作为没有潜在照射的指示, 但测量出来的表面污染水平不可能和放射性核素的体内含量有定量的关系。

(b) 空气取样

(30) 测量气载放射性核素可以对工作人员所受的照射给出比较直接的估算。在最近一次专业会议上^[20, 24, 25]讨论了这种监测在铀矿工人和铀加工工人方面的应用。在氦和氡(及其子体)的情

况下,空气测量被用于计算支气管所受的辐射剂量^[26-28]。为了要评价实验室和原子能工厂中气载放射性灰尘所引起的体内污染的程度,空气污染的测量只能给出间接的估算。但这种测量在下列情形下具有重要的实用价值:

1. 在由于吸入而造成体内污染的情形下,当同其他测量相配合的时候,鉴别空气中放射性核素的种类可提供有价值的初步资料。
2. 在一次严重事故性吸入的情况下,如果吸入的放射性核素并不发射贯穿性辐射,则空气样品的测量结果也许是可以获得的唯一的用来指导医学处理的早期资料,而且对于不可转移性放射性核素来说,这是最重要的资料。
3. 假如工作场所的适当的空气取样一贯地表明不存在气载放射性,就可减少工作人员排泄物或体内放射性核素常规测量的次数。

然而,必须记住这些监测方法的一些局限性^[29]:

只有当空气取样是个人取样的时候,也就是在靠近人的鼻部收集到的空气,它才是最有代表性的。取样点离开这个位置越远,监测的代表性就越差。

空气中如有“强粒子”或“热粒子”存在,会引起大的误差,因为人吸入的这类粒子的数目与空气样品中收集到的数目可能不相符,而两者间的差别代表着很大数量的放射性。

在理论上,可指望应用统计方法来处理空气取样的结果以指示其可靠性,但统计学的应用并不简单^[30]。

收集气载粒子和测量它们所带有的放射性,并不能准确量度肺中可能的沉积和滞留。曾经有人指出^[6]沉积在呼吸道中的位置和数量显著地依赖于粒子的大小,在估计气载放射性核素所引起的剂量时必须考虑在内。

(c) 排泄物和其他生物样品的分析

(31) 分析排泄物和其他生物样品可用来检查身体内的各种放射性核素,在某些情况下,可以用来估算体内含量。这种分析的

优点是在测量时不需要受验者在场, 因为样品的分析是在中心实验室进行的。但是放射化学的和分析的操作要花费较多的时间, 因此得出的结果往往不能及时, 而且不可能重新获得另外一个完全相同的样品。在许多情况下, 在排泄物的分析中需要测量极小量的放射性核素, 而且技术上也是可能做到的。此时, 在取样和分析过程中样品的外来污染的问题就可能变得很尖锐。

(32) 排泄物的收集在一定程度上要求被监测对象的合作; 他也许不太乐意在长时间内定期地提供样品, 然而在很多情况下为了适应保健物理的控制, 他这样做是必不可少的。

(33) 为了评价体内污染而分析生物样品时, 必须选择最适合这种核素的化学和物理形式、代谢行为以及污染途径的一种样品。可能的样品是: 尿、粪、呼出气、鼻涕、痰、唾液和汗。人体组织如象血液和毛发, 也可以进行分析。这些在文献[31]中已经讨论。

(34) 尿 收集尿样有两种特殊困难。一是假如在工作时间取样, 有可能发生外来污染。另一个问题是收集来的样品有可能由此计算出每单位时间(一般是每天)的放射性核素的总排泄量。收集全部 24 小时的尿样总是不太方便的, 所以常常需要估算一份尿样所占的一昼夜排泄量的分数。通常采用的方法是测量尿样中的肌酐含量, 并计算它所代表的一昼夜排泄量中的分数, 因为每天的肌酐排泄量是比较恒定的^[32]。

(35) 测量尿中放射性核素含量的优点之一是, 假如在一份小心收集的尿样中发现了某一放射性核素, 那么毫无疑问它是存在于细胞外体液中的。此外, 在最有利的情形下, 一天内随尿排泄的放射性核素的数量可以直接用来计算体内总含量。一个有实际重要性的最简单的例子是氧化氟, 它在尿中的浓度等于在身体的细胞外体液中的浓度。在其他一些例子中, 尿中排泄量和体内含量之间的关系比较复杂, 可参阅附录 C。

(36) 应当认识到 ICRP 第 2 号出版物表 9 中所描述的标准人每天摄入和排出的水分只是代表实际上变化范围很大的一个平均值。例如据报道^[33]在印度, 平均一个工人每天摄入 4.5 升水, 而

不是 ICRP 第 2 号出版物所假定的 2.2 升。每分钟的出汗量从某一很低值到 38 毫升之间变化^[34]。70 公斤体重的人每天排尿量可在 600—2000 毫升之间变化^[34]。

(37) 波钦(Pochin)^[35]曾指出用各种廓清试验所测得的肾功能的变化很大。即使把测量结果按单位身体表面积计算,它们偏离平均值达 15—25%。

(38) 从上面的调查看来,每单位时间排泄出的放射性核素占体内含量的份数有很大的个体差异,是不足为奇的,甚至在尽可能细心控制的条件下测量到的分数也是如此。两个例子是:

1. 波钦^[35]叙述了 98 名甲状腺分泌缺乏的病人,放射性碘排泄量的测量结果,这种排泄代表着碘的非甲状腺代谢。半排期平均为 0.55 天,标准偏差为 0.16 天。

2. 有几篇文献报道了在他们的骨骼中含有放射性核素的一些人在尿中排泄的这些核素,各天之间的涨落很大。缪勒(Müller)^[36]等对 Sr^{90} 观察到了这种涨落,基欧(Kehoe)^[37]对铅进行了观察。比奇(Beach)和多尔芬(Dolphin)^[38]报道了对几名工人进行 357 次尿钚测量的结果,甚至把测量结果归一化之后,全部的归一化数据呈现出对数正态分布。这些作者还指出为了减小起伏,应当把同一个人的几份尿样的测量数据合并在一起。

(39) 粪 在文献[31],[39]和[40]中,广泛地讨论了在生物检验程序中粪的分析所起的作用。他们论述了这类生物检验的许多优缺点。对于可转移性放射性核素所造成的体内污染,关于粪的排泄和体内含量之间的定量关系的资料很少。粪的分析最适合于探测不可转移性物质的摄入,和提供这类物质从肺中清除出来的证据。

(40) 假如知道放射性核素是以不可转移性的形式食入的,则可根据粪样分析估算肠粘膜所受的辐射剂量。对于 β 发射体来说,这个剂量反比于其中分布有这种放射性核素的肠包容物的质量,而正比于放射性核素停留在所考虑的肠道部分的时间。文献[1]表 11 给出标准人四部分胃肠道的质量和滞留时间。但是必须知