

E.T.莱萨德等著
夏益华

夏益华译

内照射摄入量 估算手册

世界图书出版公司

内照射摄入量估算手册

Edward T. Lessard¹, 夏益华², Kenneth W. Skrabble³,
George E. Chabot³, Clayton S. French³,
Thomas R. Labone³, John R. Johnson⁴, Darrell R. Fisher⁵,
Richard Belanger⁶, Joyce Landmann Lipsztein⁷

等 著

夏 益 华 译

世界图书出版公司

内 容 简 介

随着核科学技术和医疗卫生事业的发展,辐射对人体的影响已成为一个十分重要的问题。但是,直到现在,有关内照射摄入量的推算方法却一直是不统一的,尤其在事故摄入的早期阶段。本书的目的就在于系统完整地介绍一种统一的推算方法,并对如何推算摄入量和待积器官剂量当量提供指导。书中对数百种核素编制了从内照射测量结果推算摄入量的换算表,并列举一些应用实例。可供辐射防护、环境保护、卫生系统、同位素应用、放射医学和放射生物学及有关领域的科技人员和实际工作者使用。

INTERPRETATION OF BIOASSAY MEASUREMENTS

BY

E.T. LESSARD, XIA YIHUA, K. W. SKRABLE
G.E. CHABOT, C. S. FRENCH, T. R. LABONE
J. R. JOHNSON, D. R. FISHER, R. BELANGER
J. L. LIPSZTEIN

内照射摄入量估算手册

E. T. 莱萨德 夏益华 K. W. 斯科拉勃 等著
夏 益 华 译

世界图书出版公司出版

北京朝内大街137号

新华书店北京发行所发行

红旗印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 53 字数: 1200千字

1988年10月第一版

1988年10月第一次印刷

印数: 1120册

ISBN7-5062-0207-7/X·1

定价: 29元

译者的话

自从ICRP（国际辐射防护委员会）26号出版物问世以来，内照射评价体系也产生了相应的变化。过去长期沿用的最大容许浓度（MPC）和最大容许体负荷量（MPBB）等概念，由于往往被误解和误用而被放弃了，代之以年摄入量限值（ALI）和导出空气浓度（DAC）两个新概念。与此同时，近十年来在代谢模型和参数上也有了新的进展。和MPC及MPBB不同，在新的体系中，作为内照射评价直接依据的是它的次级限值——ALI。ALI的引入，显然使内照射评价工作更为科学和合理。但是和生物分析量不同，ALI一般是不易直接测定的。即使对于能熟练应用ICRP 30号出版物提供的模型和方法，根据生物分析测定量来推算摄入量的读者，这种逐个推算工作也会是比较麻烦和费时的。十分明显，目前在ICRP新的内照射评价体系和它的实际应用之间还存在着一定的间距。我们相信，这本主要介绍内照射评价方法的实际应用的书的翻译出版，对于更新和统一我国的内照射评价工作将会起到积极的推动作用。

在名词术语的翻译上，为了便于理解，尽量考虑了ICRP 30号出版物等原译本中的译名。

夏益华

1987年12月

附注：

本工作由美国核管会核条例研究办公室资助。

本出版物由美国核管会辐射应用和地球科学部核准。(NRC FIN. A-3289)

美国核管会项目主管：B. G. Brooks 和 A. Brodsky.

作者单位如下：

1. Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, USA.
2. 中华人民共和国，北京原子能科学研究院.
3. University of Lowell, Lowell, Massachusetts, USA.
4. Chalk River Nuclear Laboratory, Ontario, Canada.
5. Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington, USA.
6. Science Applications International Corporation, San Diego, California, USA.
7. Commissao Nacional de Energia Nuclear, Sao Paulo, Brazil.

摘 要

这是一本内容十分广泛的手册，利用它可以把活体和离体的各种内照射测量结果换算为摄入量。时至今日，关于摄入量的推算方法一直是不统一的，特别是对于事故摄入之后的早期阶段。本手册的目的就在于系统完整地介绍一种统一的推算方法，并对如何推算摄入量和待积器官剂量当量提供指导。本手册对数百种不同的核素编制了从内照射测量结果推算摄入量的换算表。根据这些表，就可以把全身计数器、甲状腺计数器、肺部计数器的测量结果或者排泄物的测量结果转换为摄入量的估计值。表列数值大部份是利用ICRP(国际辐射防护委员会)提出的肺、肠胃道和系统滞留模型算得的[ICRP 79]。在个别情况下，则是由假(表观)滞留函数、器官滞留函数和排泄函数算得的。所有这些计算中用到的生物学和放射学参数列于附录中，所用到的数学方法的介绍则包括在第2节。对不同粒径大小的修正计算以及适用于多次或连续摄入的使用方法也作了叙述。书中还包括有一部份基于事故摄入之后进行的实际内照射测量数据来估算摄入量的应用实例，涉及的核素包括：氚、 ^{54}Mn 、 ^{60}Co 、 ^{90}Sr 、 ^{95}Nb 、放射性碘、 ^{137}Cs 、 ^{141}Ce 、 ^{144}Ce 、 ^{233}U 、天然铀和 ^{241}Am 。

前 言

本手册的目的在于为根据内照射测量结果来推算摄入量提供一种实际的和统一的方法，同时也是为建立一个有效的内照射防护纲要提供一种导则。所介绍的估计摄入量的方法为读者提供了一种快速评价内照射量大小的手段。读者可以借此判断与10CFR 20有关规定的符合程度，同时也能对內照射测量结果作出足够的解释。另外，本手册对于下列目的将是有益的：(1)确定受照人员体内或排泄物内的放射性导出调查水平，(2)确定对人员的监测频率，(3)确定合适的监测方法。读者也能对粒径在0.2和 $10\mu\text{m}$ 之间的摄入量估计作出相应的修正，还能对摄入模式为单次、多次或连续的内照射测量结果作出解释。在使用过程中，也可以对解释内照射测量结果中用到的一些模型作进一步的改进。

感 谢

作者首先要感谢美国核管会核条例研究办公室的 R. E. Alexander 先生，是他卓有洞察力地看到和肯定了本出版物的重要性，并为它争取到了资金和推荐了进行本项目的工作组。

我们也要诚挚地感谢我们项目的主管人、核管会负责辐射危险管理的 A. Brodsky 博士，以及布洛克海文国家实验所安全与环境保护部负责研究项目的副主任 J. Baum 博士对我们工作所作的科学审阅和提出的合理的建议。

我们对下列人员的出色工作和贡献表示感谢：他们是科学应用国际公司的 E. P. Hope, C. L. Clary 和 B. E. Kirstein；感谢他们为了修改 REMedy 和 DOSEYR 程序并用于验证我们的某些结果所作的努力。我们也感谢布洛克海文国家实验所的 M. Cooney 帮助我们打印了手稿，以及 C. Christie 对本工作的帮助。

目 录

摘要	IV
图目录	V
正文部分的表目录	VI
前言	VII
感谢	VIII
1. 引论	1
1.1 内照射剂量评价中的有关问题	1
1.2 所用到的计算方法、引用的文献资料以及选择核对和验证方法的依据	1
1.3 本手册的使用条件	3
2. 计算方法的描述	3
2.1 引言	3
2.2 解释内照射测量结果所需要的一些术语	5
2.3 使用代谢模型时的一些局限性	6
2.4 摄入量滞留函数及其应用	7
2.5 从摄入到排出的链式途径	7
2.5.1 放射性元素在第 n 个链式隔室内的摄入量滞留函数 $i_n(t)$	11
2.5.2 肺的摄入量滞留函数	11
2.5.2.1 肠胃道和累积粪便中吸入滞留函数	12
2.5.2.2 稳定钴在系统全身和尿中的吸入滞留函数	12
3. 滞留和排泄份额表	15
3.1 表的描述	15
4. 利用滞留份额计算内照射剂量	16
4.1 应用于吸入D类 ^{131}I 的例子	16
5. 内照射测量程序的设计和实施	18
5.1 导出调查水平	18
5.2 监测频率	19
5.3 导出调查水平表	20
6. 总体性评价	20
6.1 表列结果的验证	20
6.1.1 REMedy 模型的一般描述	20
6.1.2 DOSEDAY 和DOSEYR 的一般描述	26
6.1.3 验证检验用的输入值	26
6.1.4 验证结果	27
6.1.5 由验证检验得出的几点结论	27
6.2 IRF 值的限制和应用	39
6.3 对今后工作的建议	40

7. 总结	41
8. 参考文献	42
附录A——根据实际经验数据使用和验证本手册的例子	A—1
A.1 引言	A—1
A.2 D类铀的吸入	A—1
A.3 D类 ¹³⁷ Cs和W类 ⁶⁰ Co的吸入	A—3
A.4 放射性碘的食人和吸入	A—3
A.5 钍和铀的吸入	A—7
A.6 氡的照射	A—9
A.7 对 ⁵⁴ Mn, ⁶⁰ Co, ⁹⁰ Sr, ⁹⁵ Nb, ¹³⁷ Cs, ¹⁴¹ Ce, ¹⁴⁴ Ce, ²³³ U 和 ²⁴¹ Am 的食人和吸入模型的验证	A—10
A.8 参考文献	A—23
附录B——数据表	B—1
B.1 引言	B—1
B.1.1 按原子序数排列的D类表	B—2
B.1.2 按原子序数排列的W类表	B—4
B.1.3 按原子序数排列的Y类表	B—6
B.1.4 按原子序数排列的吸入表	B—7
B.1.5 按原子序数排列的生物学和放射学参数表	B—9
B.2 单次吸入粒径为1 μm (AMAD) 的D类气溶胶后的滞留和排泄份额表	B—12
B.3 单次吸入粒径为1 μm (AMAD) 的W类气溶胶后的滞留和排泄份额表	B—164
B.4 单次吸入粒径为1 μm (AMAD) 的Y类气溶胶后的滞留和排泄份额表	B—359
B.5 单次食入后的滞留和排泄份额表	B—467
B.6 单次摄入 ¹⁴ CO ₂ , ¹⁴ CO 和氡水或氡蒸气后的滞留和排泄份额表	B—708
B.7 本手册中用到的生物学和放射学参数表	B—712
B.8 粒径不等于1 μm (AMAD) 时的滞留份额	B—757
B.9 多次摄入和连续摄入某些核素时的滞留份额	B—759
B.10 参考文献	B—762
B.11 附录B的索引	B—763

图 目 录

2.1	从摄入到排泄的链式途径.....	9
2.2	$1\mu\text{m}$ (AMAD) 的稳定D类、W类或Y类化合物气溶胶在肺中吸入滞留函数.....	13
2.3	$1\mu\text{m}$ (AMAD) 的稳定D类或W类、Y类(其 f_1 和 f_u 等于0) 气溶胶在肠道和累积粪便中的吸入滞留函数.....	14
2.4	单次吸入 $1\mu\text{m}$ (AMAD) 的稳定W类钴气溶胶($f_1 = 0.55$, $f_u = 0.8$) 之后的系统滞留和尿排泄.....	14
A.2.1	人员2在吸入 UF_6 之后在排出尿中铀的测定值和计算值.....	A—5
A.4.1	在情况II, 工人一天尿样中 ^{131}I 放射性的计算值和测量值.....	A—5
A.7.1	^{60}Co 的吸入, 粪, W类.....	A—15
A.7.2	^{54}Mn 的吸入, 粪, D类.....	A—15
A.7.3	^{90}Sr 的吸入, 粪, D类.....	A—16
A.7.4	^{141}Ce 的吸入, 粪, W类.....	A—16
A.7.5	^{144}Ce 的吸入, 粪, W类.....	A—17
A.7.6	^{60}Co 的食入, 粪.....	A—17
A.7.7	^{95}Nb 的食入, 粪.....	A—18
A.7.8	^{137}Cs 的食入, 粪.....	A—18
A.7.9	^{141}Ce 的食入, 粪.....	A—19
A.7.10	^{90}Sr 的食入, 粪.....	A—19
A.7.11	^{90}Sr 的食入, 尿.....	A—20
A.7.12	^{144}Ce 的食入, 粪.....	A—20
A.7.13	^{233}U 的吸入, 尿, D类.....	A—21
A.7.14	^{241}Am 的吸入, 尿, W类.....	A—21
A.7.15	^{241}Am 的吸入, 粪, W类.....	A—22
A.7.16	吸入W类 ^{60}Co 后全身活度的计算值和测定值.....	A—22
B.8.1	粒径为0.2、1和 $10\mu\text{m}$ 的D类 ^{137}C 、W类 ^{60}Co 和Y类 ^{239}Pu 气溶胶的吸入滞留函数.....	B—757
B.9.1	W类 ^{60}Co 气溶胶的全身和24小时尿样的IRF值.....	B—760

正文部分的表目录

4.1.1 利用两个不同的测量设备以及甲状腺的IRF 值估计 ^{131}I 照射摄入量的实例	17
5.1.1 W类 $1\mu\text{m}$ AMAD 的70.8天 ^{58}Co 气溶胶在摄入后不同时间的尿样品中导出调查水平值	18
5.3.1 急性摄入的导出调查水平值	21
6.1.1 对某些吸入事件排泄物估算值的验证	28
6.1.2 对某些吸入事件活体测量估算值的验证	34
6.1.3 对某些食入事件估算值的验证	37
6.1.4 对某些甲状腺内滞留量估算值的验证	38

1. 引 论

1.1 内照射剂量评价中的有关问题

要估算工作人员或公众成员摄入体内的放射性核素所产生的内照射剂量，通常都需要对内照射测量(生物分析)结果作适当的解释。器官内或全身的放射性活度的测量结果(活体测量)，或者排泄物中放射性活度的测量结果(离体测量)，必须首先采用某种能描述该种物理和化学形态的放射性物质在体内的转移、分布和排泄行为的动力学数学模型，并把它们和摄入体内的放射性物质的量相联系。虽然对现场空气的取样结果可以对摄入量提出估计，以证明符合规程限值，但是，假若照射浓度随空间和时间变化的话，据此得出的估计是不可靠和不精确的。此时，为了估计人员的摄入量，应当采用个人监测方法，例如呼吸带空气取样和内照射测量分析方法 [Ca 72]。联邦法规10CFR 20 [FR 86] 的条例要求，为了确保空气监测纲要和内照射防护纲要中的其它部份足够有效，在已知或怀疑已发生受照事件之后，或者当这种照射足够大时，作为一种最后的质量控制方法，就需要进行内照射监测。

根据ICRP 30号出版物和不同作者提供的其它模型计算了剂量转换因子，利用这些因子就可以把估计的或计算的摄入量转换为对不同体器官的50年待积剂量，或者所谓对全身的待积有效剂量当量。但是本计算中采用的ICRP 30号出版物推荐的模型中未包括排泄隔室。因此，它们并不能直接用来由对排泄物的分析测量推算摄入量。在三里岛事故以及其它一些较大的工作人员内照射事故以后，认识到根据内照射测量数据来推算摄入量是需要的。这种计算不仅可以确定是否符合放射性物质摄入量的有关条例，而且对于进一步改进内照射剂量的估算工作是有利的。这种剂量估算，对于早期的应急医学决策和对于显著受照工作人员的长期医学追踪都是需要的。

至今为止，用摄入量来解释内照射测量数据，用的是各种不同的经验模型，它们通常会得出不一致的结果，特别是对于事故摄入之后的早期应急阶段。我们建立的导则提供了一种统一的方法，可以根据内照射测量数据来计算所有核素的摄入量。在本导则中，我们描述了这些计算并提供了关于摄入量滞留函数值的表格，这就为基于活体和离体的内照射测量数据来计算摄入量介绍了一种实际和统一的方法。

对于附录B所列出的每一种放射性核素，列出了适用于吸入ICRP 30号出版物中D类、W类和Y类物质后的摄入量滞留函数(IRF)。类似地也列出了适用于食入的IRF值。附录B的数值已包含了衰变因子。IRF值可适用于全身和肺的测量结果，也适用于根据尿和粪便样的测量结果。也列有适用于甲状腺的IRF值，它可以把对甲状腺的测量结果转化为碘同位素的摄入量估计。利用介绍的扩展应用的办法，也可以把表格用于多次和连续摄入的情况，以及用于粒径分布不同于ICRP 30号出版物中的 $1\mu\text{m}$ (AMAD)的气溶胶。

1.2 所用到的计算方法、引用的文献资料以及选择核对和验证方法的依据

所以选择这里采用的计算方法,是因为它最近已由Skrable在公开发表的文献里作了论证

和描述 [Sk 80, Sk 81, Sk 83]。利用微机和算法语言来解隔室模型中的量的方法已由 Birchall 作了介绍[Bi86]。他介绍了一种采用Basic 语言的计算方法,运行起来仅需几秒钟时间。另一方面,Skrrable 也已经编写了在HP 41CV计算器上使用Hewlett Packard 语言的程序,用它们可以解算适用于吸入或食入的滞留和排泄份额。这两位作者所采用的链式转移动力学方程,要求确定通向感兴趣隔室的所有途径。因此,这种方程将跟随核素在体内的各种转移过程而被应用很多次。不利用计算机,这类计算将是十分费时的。另外,最近已有公开编辑出版的资料[ICRP74, ICRP77, ICRP83],它们专门为辐射防护目的提供了一套能描述放射性核素在男性成年参考人体内行为的标准放射学和生理学参数。这样,根据目前可以获得的这些模型和参数,加上计算机的利用就可以选择计算IRF 值的方法。

另一方面,采用IRF 因子表(适用于活体和离体的内照射测量数据)的办法可以使计算摄入量方法更加简便。这些表内列出的数据是通过重覆应用类似于Birchall 和 Skrrable采用的计算获得的。另外,给出IRF 的表列数值(期望存在于不同隔室内的量)对于选择内照射监测程序是有帮助的。

在ICRP30 号出版物[ICRP79] 里,全身系统吸收滞留函数在很多事例中是用几个指数项之和来表达的。据此,同时也因为它适合于我们的方法,因此我们也把排泄或系统吸收滞留表达式选择一个或几个指数项之和。指数函数是适合于描述合并了诸如碘以及手册中用到的碱土元素的反馈和再循环过程的。本书中对于钷,我们采用一种最近由Jones [Jo83] 所报告的假(表现)滞留函数。对于在ICRP 20号出版物[ICRP72] 中描述的碱土元素的代谢,也基于Johnson 和 Myers (见[Sk83]) 报告的模型拟合为指数模型,包括对Ca, Sr, Ba, Ra 的拟合。这些模型的结果和ICRP 工作组给出的滞留函数[ICRP72],在摄入后 0.1 天到20000 天期间内的结果是相同的,我们在这里加以采用是因为它们适合于由Skrrable 提出的计算方法[Sk83]。对于所有其它元素的全身系统吸收滞留函数都采用ICRP 30号出版物中推荐的函数。值得注意的是,对于碘,我们这里采用了Riggs 提出的代谢模型[Ri52]。我们也愿意提醒ICRP 30号出版物的读者,Riggs 关于碘的全身系统吸收滞留函数的正确描述,是在ICRP30 号出版物的附录里[ICRP81]。

巧克河核子所(CRNL)的剂量学研究专业室三十五年多以来,一直在对它们的雇员和其它人员进行体内污染监测,并且利用ICRP 或其它模型对监测结果作出剂量学解释。当ICRP 26号出版物在1977年引入待积有效剂量当量和年摄入量限值后,他们开始了一个对代谢模型和内污染监测结果解释方法的完整评价活动。活动的一部份包括研制计算机程序和建立详细计算所需要的数据库。这些计算机程序和数据库包含了ICRP 最新推荐的模型和参数以及其它合适的模型。其中的极大多数包括的是ICRP 30号出版物中采用的代谢模型和参数,以及有关的剂量学数据。CRNL创造的这些有利条件被用来验证本书中列出的有关滞留和排泄份额表。

近三年来,科学应用国际公司(SAIC) 的研究人员也已经在研制一些计算程序,可以根据ICRP 30号出版物的代谢模型来预估滞留和排泄情况。作为本书编写中的质量控制过程的一部份,选定了我们某些表列结果,使之在相同的一组假定条件下和SAIC 模型预估的结果作了验证性比对。比对中利用了两个SAIC 程序。这些程序(在 6.1 节中有介绍)是由不同人员编制的,同时代表完全不同的计算方法。一个是用Pascal 语言书写的程序,它合并了一个分析解的计算步骤,和BNL用来得到本书中的表列结果的模式非常相似。另一个是Basic 程序,它采用Runge-Kutta 数值积分方法。

SAIC 验证过程包括对下列核素吸入和食入滞留结果的比较: ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{90}Sr ,

^{131}I , ^{137}Cs , ^{144}Ce , ^{232}Th , ^{235}U , ^{239}Pu 以及 ^{241}Am 。这个过程对于识别初步结果中的程序上的或计算上的错误是很有价值的。在识别到的差错被改正以后, 我们的表列结果和该程序计算出的结果之间符合得非常好。

某些实例被用来验证本报告中采用的模型, 具体情况见附录A。伯特莱太平洋西北实验所的D. Fisher 博士以及巴西国家核能委员会的J. L. Lipsztein 博士基于他们的经验为上述验证作了大部分工作。这些验证包括: (1) ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{90}Sr , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{233}U , ^{241}Am , ^{131}I 以及钍和天然铀的吸入, 和 (2) ^{60}Co , ^{95}Nb , ^{137}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{90}Sr 和 ^{131}I 的食入。另外也有几例是来自布洛克海文国家实验所的实际数据。

1.3 本手册的使用条件

放射性物质摄入量的估计取决于对内照射测量数据的适当解释, 而其解释方法通常并没有得到很好的说明。由于内照射测量数据的解释涉及到很多变量之间的物理学关系, 其中一部分问题的解释可能是比较复杂的。在某些情况下, 在对摄入量和剂量当量作出初步评价之后好几年还在对这种解释不断作出改进。这样, 一个合适的解释方法是要对整个评价过程中所采用过的各种方法建立一个清楚的记录。我们希望本手册能成为一本虽然包含了目前较复杂的数学模型, 但用起来却很方便的手册。这就必然会导致某些局限性, 例如: 利用参考人或其它标准模型来估算实际工作人员的摄入量。我们对方法作了详细介绍, 也对实际例子作了描述。当出现较大的照射量时, 我们建议本手册的读者能进行更具体的调查, 以便获得对于验证和改进本报告中所采用的模型和方法有价值的数据。

2. 计算方法的描述

2.1 引言

本节介绍摄入量滞留函数的计算方法。这些函数给出在一次急性照射之后, 或者连续照射开始之后的某一时刻, 预计存在于某一内照射隔室里的放射性物质占摄入量的份额。根据在该隔室中所测到的放射性物质的量除以相应于该隔室的摄入量滞留份额, 所得的商即推算得的摄入量。然后该摄入量就可以和NRC的季度摄入量限值, ICRP 30号出版物的年摄入量限值, 或者其它适当的参考水平进行比较。这种摄入量的估算方法能够对测量结果的重要性作出快速评价, 这样就可以把那些需要作进一步调查的照射和那些不需要进一步调查的照射区别开来。所用模型是基于ICRP 23号和30号出版物中总结的参考人模型 [ICRP74, ICRP 79], 但是其它拟合于ICRP结构的代谢模型也可以采用。这里的内照射隔室可以代表具体的生理学器官或组织, 例如肺或者肠胃道, 全身或排泄物。我们所考虑的摄入途径包括吸入和食入。我们讨论了对摄入量的估计和内照射剂量的估计, 以及考虑探测限所需要的监测频度。我们获得摄入量滞留函数的方法可以被纳入任何一个对人员或排泄物的内照射监测纲要之中。

基于参考人的摄入量滞留函数可用于快速评价待积有效剂量当量和待积器官或组织剂量当量。用估算得的摄入量值除以ICRP 30号出版物中给出的随机效应年摄入量限值(ALI),

得到的商乘以 5 rem，即给出受照人员的待积有效剂量当量。

也可以由摄入量和单位放射性活度摄入量在靶器官或组织内产生的待积剂量当量值的乘积来计算器官或组织剂量当量。然后再乘以权重因子（代表由器官或组织受照射产生的危险度相对于全身均匀受照射时产生的总危险度的比），便得到权重的待积器官或组织剂量当量。这种器官或组织中的权重待积剂量当量之和，就是待积有效剂量当量。每单位放射性活度摄入量的剂量当量因子(Sv/Bq) 见ICRP 30号出版物的补充部份。年龄和性别平均的权重因子见ICRP 26号出版物 [ICRP77]，但是在某些情况下也可以对它们作出修正，以反映出死亡的主要原因或者反映受照人员的性别情况。这样就可以采用根据摄入量的估算值以及 Sv/Bq 因子来估算权重待积（或待积器官和组织）剂量当量的更直接的方法。

核设施的设计要求，是保持对人员的来自外照射和内照射的剂量之和低于ICRP 和建议的NRC 待积剂量限值（见[ICRP 77] 或 [NRC84]）。针对这些待积剂量限值来建立内照射剂量评价程序，以及相应的调查、行动和记录参考水平是重要的。ICRP 给出的年摄入量限值是是根据这些待积限值导出来的一个量。为了保证有意义的内照射水平能被探测到，并被合适地调查到和记录下来，所有的内照射剂量评价程序应当能把测量结果转换为摄入量估算值。否则某些有意义的剂量（例如对于肺的剂量）就可能被忽略，假若仅仅根据排泄物的生物分析来估算系统体负荷的话。由于摄入量和待积剂量之间存在直接的关系，因此利用摄入量就提供了一种综合考虑内、外照射的方法。这样，就可以估算出在每年的工作实践中工作人员所接受的总的待积器官剂量或对全身的待积有效剂量当量。

要探测到相对于ALI来讲是有意义的摄入量，可能同时需要对工作环境和工作人员进行监测。内照射样品和空气样品的监测并不是互相排斥的；对于一个精确的内照射评价方法来讲，可能两者都是需要的 [Sk85]。当生物样品分析程序并不具备必要的灵敏度和精确度时，为了对可能受到显著内照的人员的摄入量作出估计，应当采用呼吸带空气取样。为了对照射大小作出精确评价，通常需要在环境监测和人员监测之间作出合适的权衡安排。另外，从监测工作环境过程中可以获得的有关放射性核素的物理和生物化学特性的资料可以和参考人的代谢模型结合使用，以便得到基于内照射测量数据估算摄入量所必须的摄入量滞留函数。

摄入量滞留函数，它给出在任何时刻预计存在于不同活体和离体生物分析隔室中的摄入量份额，能对于内照射监测结果的意义提供快速和有效的判断。另外，它们也可以在内照射监测纲要的设计和和执行中得到应用。例如，查得的摄入量滞留函数值可用以判断那些具有足够灵敏度的内照射监测程序。它们也可以用来计算导出调查水平。在事故情况下，摄入量滞留函数还可以用来判别那些能确定和改善摄入量估计的内照射监测程序。

下面我们讨论摄入量滞留函数的应用，包括它们的一些局限性。也包括对这些函数的推导，通过一个单途径链式动力学方程应用于多隔室模型的推导过程。这些推导的基础是采用能描述元素从摄入到排出的转移和滞留过程的适当模型。由于链式动力学方程具有递归特性，这就使得在计算器或计算机上的程序编写工作得以简化。关于不同类型摄入量函数的推导细节，以及有关它们应用于周期性内照射测量时的细节也作了介绍。

第2.2到2.5节对用于推导摄入量函数表的计算方法作了详细描述，这些表格可用于活体和离体的测量。主要描述内容如下：

1. 根据2.5.1节的方程推导的表格给出滞留的摄入量份额、24小时内排出的份额、以及作为摄入后的时间函数的排泄物中的累积份额；
2. 摄入量可以这样来估算：将肺、甲状腺、全身、尿或粪便中放射性活度的测量结果除以相应隔室中的IRF值，即得。

3. 可以确定一定的导出调查水平值, 若低于它们, 不需采取任何行动; 若高于它们, 则应当进行进一步的测量以估计待积有效剂量当量;

4. 要使个别的测量结果能在极大多数受照事例中和模型结果相吻合是不现实的。其不确定度的大小见附录A中给出的实际数据的应用实例。

若需要了解计算方法的细节, 请见第2.2到2.5节, 否则可以直接使用第3节给出的滞留和排泄份额表。

2.2 解释内照射测量结果所需要的一些术语

保健物理学家在生物样品分析和内照射剂量评价方面使用了各种不同的量或术语, 因而和这些量相应也存在各种不同的滞留函数。为了弄懂推导中用到的数学过程, 对这些量作出定义是重要的。这些术语或量包括摄入、吸收、沉积和含量:

摄入——通过吸入、食入或伤口进入体内的放射性元素的量;

吸收——被系统循环摄入的放射性元素的量, 例如注入入血, 从呼吸道或肠胃道的某些隔室中吸收, 或者在伤口附近的吸收;

沉积——沉积下来的放射性元素的量, 例如在一次急性呼吸摄入后在呼吸道里的沉积, 或者食入之后在胃中的沉积;

含量——存在于模型的某些生物分析隔室内的放射性元素的量, 这种隔室可以是一个器官、一群组织, 全身或一个排泄隔室;

基本速率常数——某一隔室中的含量仅仅由于生物学过程而造成的瞬时相对清除速率。

每一种滞留函数适用于描述某一种隔室中的含量相对于参考量的变化。因此, 每一种函数能分别得到在一次摄入、吸收或沉积之后在某一时刻预计在该隔室里的摄入、吸收或者沉积份额。一般来讲, 方程中的大写字母代表稳定元素的量, 小写字母代表放射性核素的量。脚标用于识别隔室。

在一次放射性气溶胶的急性吸入事例中, 预计被吸入放射性活度的63%将沉积在肺中。由肺中摄入量滞留函数给出的预计沉积在肺中的初始摄入量份额在 $t = 0$ 时为0.63; 而由肺中沉积滞留函数给出的预计在 $t = 0$ 存在于肺中的沉积份额为1.0。吸收滞留函数给出的是在一次吸收之后某时刻预计存在于某隔室中的急性吸收份额。对系统全身和细胞外体液的吸收滞留函数值在 $t = 0$ 时必须等于1.0。而对外周组织和器官的吸收滞留函数值在 $t = 0$ 时则等于0。

另一个重要术语是基本速率常数。清除过程可以包括从体内排出或简单回到细胞外体液。基本速率常数可以和任何器官或组织相联系。这些基本速率常数可能是难于确定的, 因为一部份沉积物在它们从某一器官内清除出去以后, 还可能又回到那个器官里去。这样, 从某一器官里损失速率的测定值将可能低于基本的损失速率, 因为一小部份物质有可能再循环回到原来器官。

吸收滞留函数是一种数学上的表达或者经验性表达式, 它们可能包含若干指数项。在一定条件下, 其中一些项可以和某些生理学隔室相联系。假若不存在明显的再循环的话, 这种表达式中有一项可以代表中央隔室。所谓中央隔室, 可以模糊地定义为这样一个隔室: 它包括血液和细胞外体液, 即在该隔室中的物质是可以自由流动的。数学表达式中的其余各项可能和某些外周器官相联系, 例如骨或甲状腺。这些隔室中的物质包括包含在细胞内的和附着在器官表面上的两部份。再者, 这种生理上的联系是故意模糊的, 仅仅只有当不存在明显的

再循环时才可以应用。

假若这种描述放射性元素从某个隔室中清除的代谢过程可以用线性一阶动力学方程的话,那么其沉积滞留函数将用一个系数为 1 的单个指数项来描述。这种简单的沉积滞留函数给出在其后某时刻所预期的沉积份额。这种沉积滞留函数对于通过食入的情况下可适用于胃以及呼吸道内的某些隔室。

假若一个系统器官或组织的滞留是简单的,那么器官的沉积滞留函数将由其系数为 1 的单个指数项给出。其函数代表在沉积之后某一时刻预期存在的沉积份额,而忽略了元素的任何再循环。然而,若有再循环过程的存在,这种沉积滞留函数将并不描述器官或组织内的实际含量。

假若不存在从器官的直接排出,那么基本的生物学速率常数(它是出现在器官沉积滞留函数的指数部份中的一项)描述了稳定元素向中央隔室的转移。单个器官的沉积滞留函数可能由单个指数项给出;但另一方面,同一器官的吸收滞留函数通常将由几个具有常系数的指数项之和组成。这些系数的代数和在 $t = 0$ 时必须等于 0。很多外周器官和组织隔室,可以每一个都有一个简单的沉积滞留函数,它们由包含一个特征基本速率常数的单个指数项来描述。这个速率常数的值将表征向直接排泄或中央隔室的总的生物学清除过程。

假若出现稳定元素的明显再循环,那么对于每一个外周隔室和中央隔室的吸收滞留函数将包含相同数目的指数项。然而,在这些指数项中间的速率常数将不等于基本速率常数。在有再循环的情况下,每个隔室的吸收滞留函数和系统全身的吸收滞留函数将具有相同的指数项,但它们的系数不同。假若有明显的再循环现象发生,那么系统全身的吸收滞留函数中的速率常数将并不描述在某一具体隔室内的沉积的实际滞留情况。这些速率常数是有效速率常数,它们考虑到了发生在中央隔室和外周隔室之间的污染物的再循环。在这种情况下,实际上不能用一个单个指数项来和一个具体结构的隔室相联系[Sk80]。

假若不存在明显的再循环,那么吸收滞留函数中的速率常数等于基本速率常数。此时,对中央隔室的稳定元素吸收滞留函数将由单个指数项给出。该中央隔室项将包含有描述所有清除途径的基本速率常数。在无明显再循环的情况下,每个外周器官隔室的稳定元素吸收滞留函数将包含有两个指数项,一个具有基本的总清除速率常数,是对中央隔室的;一个具有总的生物学清除速率常数,是对器官的。此时,对系统全身的吸收滞留函数中的各别指数项可以和具体的组织或器官相对应。

ICRP 30 号出版物[ICRP79] 中有关元素分布和滞留的描述对再循环现象已作了简化。由于大多数滞留函数的个别指数项不能和具体的器官相联系,因此,在采用 ICRP 30 号出版物中的描述来建立生物分析模型(这些模型对于生物分析数据意义的初步评价是必须的)时必须十分小心。另外,在推导我们的吸收滞留函数时并不包括有所谓的“转移隔室”。ICRP 引入这个转移隔室是为了数学上的方便[ICRP79],但事实上任何转移隔室的滞留确实已被包含在系统全身的经验性吸收滞留函数内了。

2.3 使用代谢模型时的一些局限性

为了把生物分析数据解释为摄入量并估计出内照射剂量,需要作出很多假设。这些假设包括对排入生物分析排泄隔室的系统排泄份额的假定值,以及关于放射性核素在呼吸道内沉积之后被吸收份额的假定值。由于物理的、化学的以及生物学特性上的复杂性都会影响到放射性核素在体内的分布,不作出很多假设就不可能根据全身滞留函数来推算年或待积有效剂