



中华人民共和国国家标准

GB/T 16148—2009
代替 GB/T 16148—1995

放射性核素摄入量及内照射剂量 估算规范

Specification for assessments of intakes and
internal doses of radionuclides

2009-10-15 发布

2009-12-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会

发布



目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 摄入途径和模式	2
5 摄入量的测量和估算	2
6 内照射剂量估算及方法	3
7 不确定度估算中应考虑的因素	3
附录 A (资料性附录) 生物动力学和剂量学模型	4
附录 B (资料性附录) 用直接和间接测量数据估算摄入量的方法	7
附录 C (资料性附录) 主要核素的剂量系数	9
附录 D (资料性附录) 摄入量和内照射剂量估算举例	12

前 言

根据《中华人民共和国职业病防治法》制定本标准。

本标准在修订中,主要参考了国际原子能组织 IAEA 的 No. 37 安全标准《由于摄入放射性核素引起的职业辐射剂量的估算方法》(2004 年)。

本标准代替 GB/T 16148—1995《放射性核素摄入量及内照射剂量估算规范》。

本标准与 GB/T 16148—1995 相比,主要修改如下:

- 在内照射呼吸道模型上,原标准是基于 ICRP 30 号出版物的模型,而本标准是基于 ICRP 66 号出版物的模型;
- 在职业照射情况下,采用 GBZ 129—2002《职业性内照射个人监测规范》推荐的摄入量估算方法替代了摄入滞留函数值或摄入排泄函数值进行估算的方法;
- 在用摄入量进行内照射剂量估算时,采用了 ICRP 的 67、69、71 和 72 出版物推荐的待积组织或器官剂量系数 $[h_T(\tau)]$ 和待积有效剂量系数 $[e(\tau)]$ 取代了原标准中的摄入量剂量转换因子 $[(DCF)_{50,T}, (DCF)_{50,E}]$ 。

本标准的附录 A、附录 B、附录 C、附录 D 为资料性附录。

本标准由中华人民共和国卫生部提出并归口。

本标准由中华人民共和国卫生部负责解释。

本标准起草单位:中国医学科学院放射医学研究所。

本标准主要起草人:刘庆芬、刘强、武权、樊体强、张良安。

本标准所代替标准的历次版本发布情况为:

- GB/T 16148—1995。

放射性核素摄入量及内照射剂量 估算规范

1 范围

本标准规定了放射性核素摄入量的测量与估算、内照射剂量估算和方法以及不确定度估算中应考虑的因素。

本标准适用于职业性和公众照射的放射性核素摄入量及内照射剂量估算工作。

2 规范性引用文件

下列文件中的条款通过本标准的引用而成为本标准的条款。凡是标注日期的引用文件,其随后所有的修改单(不包括勘误的内容)或修订版均不适用于本标准,然而,鼓励根据本标准达成协议的各方研究是否可使用这些文件的最新版本。凡是不注明日期的引用文件,其最新版本适用于本标准。

GBZ 129—2002 职业性内照射个人监测规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本标准。

3.1

摄入量 intake

进入人体的放射性核素的量。其进入途径有吸入、食人和通过伤口或完好皮肤。

3.2

吸收量 uptake

摄入体内后进入细胞外液的放射性核素的量。

3.3

滞留量 retention

摄入放射性核素后的不同时间,滞留在器官、组织或全身内的放射性核素量。被体液摄取的核素量称作系统滞留量。系统滞留量和在呼吸道及胃肠道内的滞留量之和称全身滞留量。

3.4

沉积 deposition

摄入体内后,在摄入器官内沉积下来的放射性核素量。例如在一次急性吸入之后沉积在胃肠道内的放射性核素量。

3.5

呼吸道模型 human respiratory tract model, HRTM

用于估算通过呼吸方式摄入放射性核素的数学模式。HRTM分为鼻前部气道 ET_1 、咽喉 ET_2 (由鼻后部和口气道组成)、气管和主支气管BB、细支气管bb和小泡空隙AI(气体交换)5个区。 ET_1 和 ET_2 合称头部气道ET,淋巴细胞与这个区有关。BB,bb和AI是胸部的三个区。

3.6

胃肠道模型 gastrointestinal tract model, GITM

用于估算通过食入方式摄入放射性核素的数学模式。它系指ICRP胃肠道模型,通常分为胃、小肠、上段大肠和下段大肠四个部分。在计算有效剂量时,这四个部分按独立的器官对待。

3.7

直接测量 direct measurements

全身或器官中放射性物质含量的直接测量技术。它是一种全身监测和局部体外监测。主要用于发射特征 X 射线、γ 射线、正电子和高能 β 粒子的放射性核素,也可用于某些发射特征 X 射线的 α 辐射体。

3.8

间接测量 indirect measurements

监测人体排泄物及其他生物样品的测量技术。对于不发射 γ 射线或只发射低能光子的放射性核素、发射高能 β、γ 射线的辐射体,间接测量是合适的监测技术。在常规监测中,排泄物监测一般只包括尿分析。

3.9

空气动力学直径活度中值 activity median aerodynamic diameter, AMAD

某个气溶胶粒子在空气中沉降时的滑流速度,与一个密度为 1 mg/cm³ 的球体在相同的空气动力学条件下沉降时的滑流速度相等,此球体的直径称为该气溶胶粒子的空气动力学直径。如果在所有的气溶胶粒子中,直径大于和小于上述空气动力学直径的粒子各占总活度的一半,则此直径称为活度中值空气动力学直径。

3.10

空气热动力学直径活度中值 activity median thermodynamic diameter, AMTD

它是一种空气动力学直径,对更小的微粒,它的沉积主要由开始的扩散产生,当微粒中空降放射性 50%来自小于 AMAD 的微粒,另 50%来自大于 AMAD 的微粒。

4 摄入途径和模式

采用 ICRP 推荐的摄入、转移和排泄路径及通用模型,胃肠道数学模型和人体呼吸道数学模型(参见附录 A)。

5 摄入量的测量和估算

5.1 摄入量测量的主要方法

5.1.1 应用直接测量(体外测量)、间接测量(生物样品检测)和空气采样测量给出的全身、器官或组织、生物样品和工作环境中放射性核素的测量结果,估算摄入量。

5.1.2 直接测量或间接测量体内某一核素(j)是 M(Bq)时,该核素的摄入量 A_{j,0}(单位 Bq)用式(1)计算:

$$A_{j,0} = M/m(t) \dots\dots\dots(1)$$

式中:

m(t)——摄入 1 Bq 某核素 t 天时体内或器官内核素的含量(Bq),无量纲;

M——放射性核素的测量结果,单位为贝可(Bq);

t——摄入核素到测量时的天数。

以上公式不适用于连续摄入的情况,在连续摄入(例如职业照射)的情况,此时应用 m(T/2)代替 m(t)进行计算,T 为监测周期(d)。

参数 m(t)和 m(T/2)可从 GBZ 129—2002 中查出。除了测量结果 M 外,用式(1)计算摄入量还必须有摄入途径和摄入时间的信息和数据。

5.1.3 当用个人空气采样方法估算通过呼吸道的摄入量时,用式(2)进行估算。

$$A_{j,吸} = C_{j,空} B_{空} \dots\dots\dots(2)$$

式中:

C_{j,空}——核素 j 在空气中的时间积分浓度(Bq · s/m³);

$A_{j\text{吸}}$ ——摄入量的时间积分值；

$B_{\text{空}}$ ——人员呼吸率,单位为立方米每秒(m^3/s)。

本标准建议用个人空气采样的方法进行测量 $C_{j\text{空}}$;推荐使用 UNSCEAR 建议的 $B_{\text{空}}$ 值,成人数据为 $0.83 \text{ m}^3/\text{h}$,1 岁以下、1 岁、5 岁、10 岁和 15 岁的值分别取为 0.13 、 0.23 、 0.37 、 0.60 、 $0.77 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

5.2 其他情况采用的方法参见附录 B 中第 B.2 章。

6 内照射剂量估算及方法

6.1 待积器官剂量 $H_T(\tau)$ 和待积有效剂量 $E(\tau)$ 的估算分别采用式(3)和式(4)计算:

$$E(\tau) = A_0 e(\tau) \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$H_T(\tau) = A_0(\tau) h_T(\tau) \quad \dots\dots\dots(4)$$

式中:

A_0 ——放射性核素的摄入量,单位为贝可(Bq);

$h_T(\tau)$ ——每单位摄入量的待积组织或器官的辐射权重剂量,单位为希每贝可(Sv/Bq);

$e(\tau)$ ——每单位摄入量引起的待积有效剂量,单位为希每贝可(Sv/Bq)。

本标准推荐的 $e(\tau)$ 和 $h_T(\tau)$ 值参见附录 C。

在低于剂量限值的十分之一的小剂量情况时,才可用工作场所的监测数据粗略估算内照射剂量,但应至少要有以下信息核素、化合物的化学形态、气溶胶粒子大小($1 \mu\text{m}$ 或 $5 \mu\text{m}$)、摄入方式和路径等。

当待积有效剂量估计值低于 1 mSv 时,不必用内照射个人剂量监测的办法进行内剂量估算,这时可用场所监测数据粗略计算。

当待积有效剂量估计值高于 5 mSv 时,需要应用个体的特定受照时间和途径等信息,这时可得到更为真实的剂量估算结果。

6.2 测量和估算时应对不同核素(j)分别测量,用式(1)估算摄入量,用式(3)和式(4)进行待积器官剂量 $H_T(\tau)$ 和待积有效剂量 $E(\tau)$ 的估算后,按式(5)、式(6)估算总剂量。

$$H_T(\tau) = \sum_j A_{j,0}(\tau) h_{j,T}(\tau) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$E(\tau) = \sum_j A_{j,0} e_j(\tau) \quad \dots\dots\dots(6)$$

6.3 内照射剂量估算的具体方法见附录 D。

7 不确定度估算中应考虑的因素

7.1 检测结果引起的不确定度

所有量化放射性核素的操作程序都会引起随机和系统误差。体内和体外测量的不确定度来源应包括样品体积和重量的量化、稀释和吸移管误差、溶液存放期间的蒸发、用于校准用标准活度及其稳定性、空白校正、本底及其涨落、电子学稳定性、谱分辨率和峰交叠;样品污染和杂质、计算时源的位置、校准模样的形状和密度、校准中同质性假设、统计计算误差等。

7.2 摄入特征引起的不确定度

时间模式是不确定度的一个主要来源,通常假定为急性摄入、短时间内持续摄入、长时期的延续性摄入。在很多情况下,是既有吸入,也有食入,这时用单一路径假设解释生物检测数据会引起很大的误差。

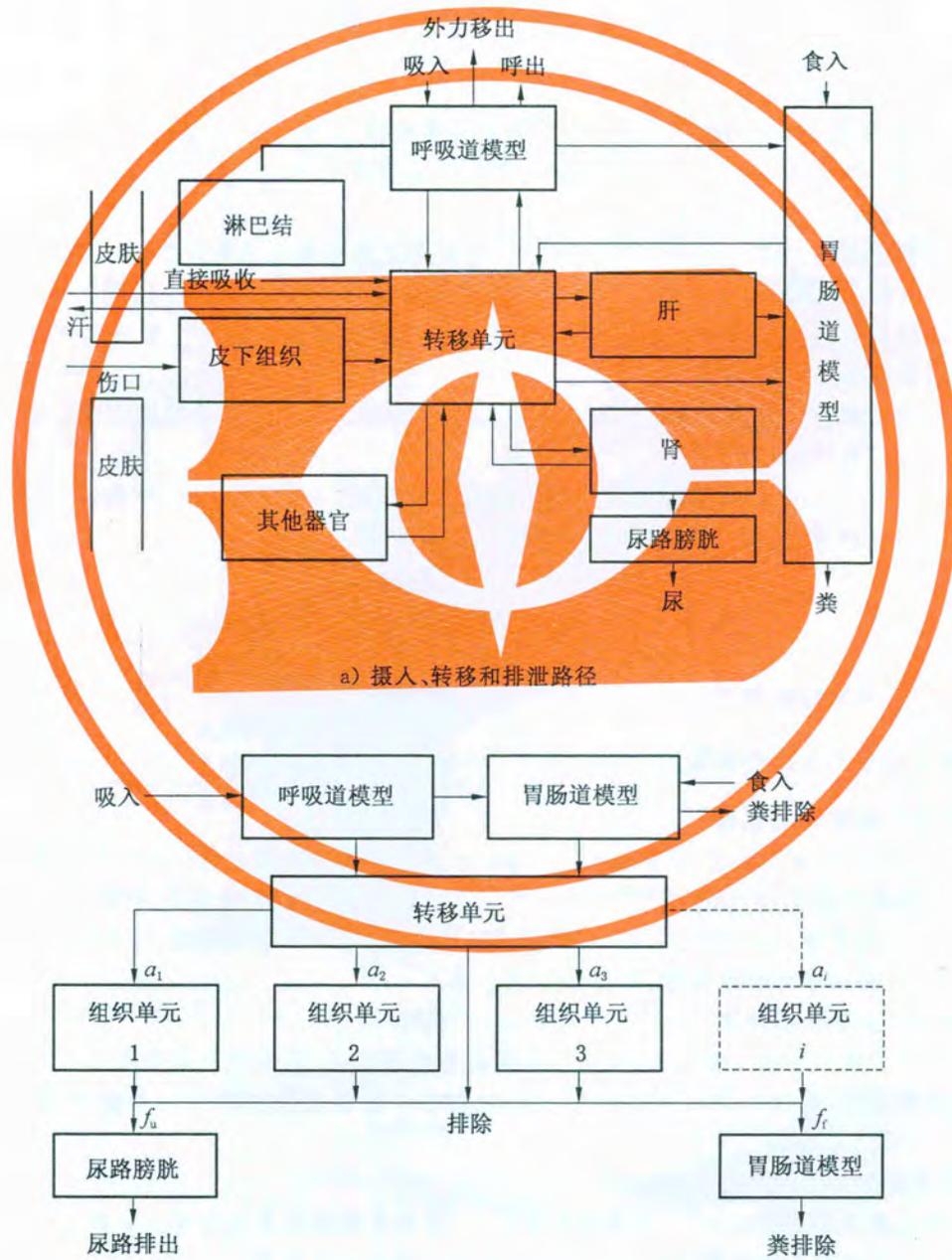
7.3 生物动力学和剂量学模型不确定度

此类不确定度主要由随机变异,单个化合物吸收、转移和排泄值及其分布信息缺乏引起。模型对器官的大小、形状、质量和几何关系的简化假设也是不确定度的重要来源。

生物动力学模型基于参考个体形成群体的一个平均值,这些参数的组合也是不确定度的重要来源。

附录 A
(资料性附录)
生物动力学和剂量学模型

A.1 摄入、转移和排泄路径(图 A.1)



b) 描述体内不同隔室单元中放射性核素动力学行为的通用模型

图 A.1 摄入、转移和排泄路径

A.2 用于摄入量和剂量计算的胃肠道数学模型(图 A.2)

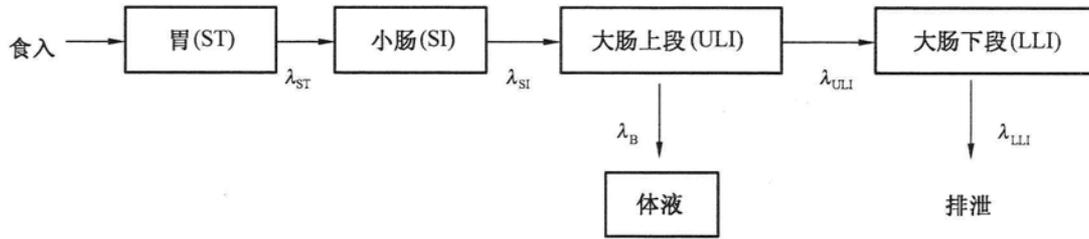


图 A.2 用于摄入量和剂量计算的胃肠道数学模型

A.3 用于摄入量和剂量计算的人体呼吸道数学模型(图 A.3)

HRTM 分为鼻前部气道 ET₁、咽喉 ET₂(由鼻后部和口气道组成)、气管和主支气管 BB、细支气管 bb 和小泡空隙 AI(气体交换)5 个区(附录 C)。ET₁ 和 ET₂ 合称头部气道 ET, 淋巴细胞与这个区有关。BB, bb 和 AI 是胸部的三个区。

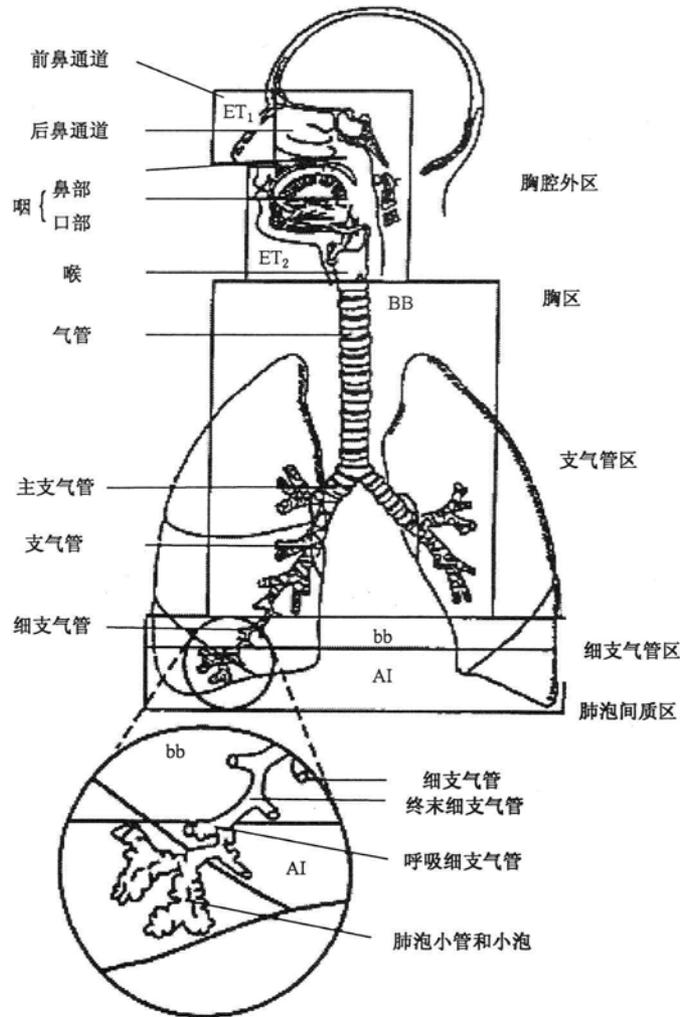


图 A.3 用于摄入量和剂量计算的人体呼吸道数学模型

A.3.1 吸入

A.3.1.1 吸入的沉积和清除分别按 HRTM 处理。HRTM 适用于所有人群,对职业人员、公众、婴儿

及儿童都应使用各自的参考值。

A. 3. 1. 2 HRTM 可用来计算肺的平均剂量和呼吸道其他组织的剂量,这时考虑了不同组织的辐射敏感度。

A. 3. 1. 3 在职业内照射剂量估算时,吸入的气溶胶粒子的大小取为 $5\ \mu\text{m}$ AMAD。

A. 3. 1. 4 在内照射剂量估算推荐的物质溶解率分为 F 类(快)、M 类(中度)和 S 类(慢):

- a) F 类: 几乎所有沉积在 BB, bb 和 AI 的 F 类物质都被迅速吸收,沉积在 ET_2 区的 50% 通过粒子输运被廓清到 GI 道,另一半被吸收。所有物质被吸收的生物半排期为 10 min。典型的例子是铯和碘的化合物;
- b) M 类: 沉积在 BB, bb 和 AI 的 10% 的 M 类物质和沉积在 ET_2 区的 5% 的 M 类物质被迅速吸收,大约有 70% 沉积在 AI 区的最终被吸收到体液。被吸收的 10% 物质的生物半排期为 10 min, 90% 物质的生物半排期为 140 d,典型的例子是镭和镭的化合物;
- c) S 类: ET, BB 或 bb 区吸收的很少,大约有 10% 沉积在 AI 区的最终被吸收到体液。被吸收的 0.1% 物质的生物半排期为 10 min, 99.9% 物质的生物半排期为 7 000 d。典型的例子是铀和钚的不能溶解的化合物。

A. 3. 1. 5 在 HRTM 模型中,吸入的气体或蒸气被分为三类:

- a) SR-0 类,不溶性和不反应的,忽略在呼吸道的沉积,例如 ^{41}Ar , ^{85}Kr 和 ^{133}Xe ;
- b) SR-1 类,可溶性和可反应的,在呼吸道可能沉积,例如,氡气, ^{14}CO , ^{131}I 蒸气和 ^{195}Hg 蒸气;
- c) SR-2 类,易溶解和反应,全部沉积在 ET_2 ,例如,HTO。

A. 3. 2 食入

在内剂量估算时,食物在胃肠道模型的胃、小肠、大肠上段和大肠下段四段中的停留时间分别取为 1 h、4 h、13 h 和 24 h。核素的吸收通常发生在小肠。

通过 GI 道和呼吸道转移到体液后,一个元素将按适当的 ICRP 模式,或被沉积在器官及组织上,或被排泄出体外。一般地说,在体液内的生物半衰期为 6 h。

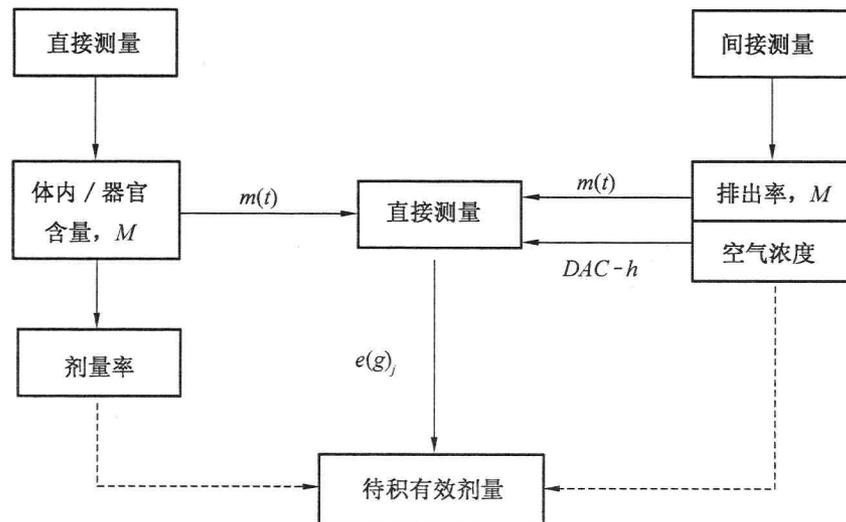
A. 3. 3 伤口和完好皮肤摄入

这时很多含放射性的物质可能保留在伤口处,可溶性物质可转移到血液当中,此时可近似的采用直接摄入到血液(注射)的数据,但这是一个很粗的过高的估算;不溶性物质以很慢的速度转移到附近的淋巴组织中,再逐渐溶解,最终转移到血液,这时可以不用计算。

附录 B
(资料性附录)

用直接和间接测量数据估算摄入量的方法

B.1 直接和间接测量数据估算摄入量的方法(A)的逻辑框图(图 B.1)



注：虚线表示可选用的其他方法。

图 B.1 直接和间接测量数据估算摄入量的方法(A)的逻辑框图

B.2 其他情况采用的方法

B.2.1 突发事件引起的特殊生物样品检测,可以认为事件发生时间就是摄入时间的起始时间;连续性监测通用近似将监测周期的中点视为摄入时间,然而当摄入和有效剂量高出剂量限值,就不应用这种近似,而应使用摄入时间的实际值,此时应按 GBZ 129—2002 的方法确定。

B.2.2 如果无法确定摄入时间,并且摄入还在延迟,这时可假定是慢性摄入的情况,对于 n 天的监测间隔时间,每天的摄入为总摄入的 $1/n$ 。

B.2.3 尽管在工作场所中吸入是最常发生的摄入方式,但也确有食入和从伤口摄入的情况会偶尔发生。原则上可通过吸入和食入的列表分析来确定摄入途径,从而可以确定需选用的 $m(t)$,具体方法按 GBZ 129—2002 的方法进行。

B.2.4 用直接测量值进行放射性核素的估算时,肺的计算分析可用来区分吸入和食入,但放射性核素是不可溶形态时,要分析和确定路径就十分困难,这时需要对排泄样品进行摄入后尽早检测和较长期的连续检测。

B.2.5 确定慢性长期照射的有效方法是让工作人员离开放射性工作场所 15 d 后进行测量和分析。

B.2.6 应注意的是在吸入较大气溶胶粒子(例如:AMAD $>15\ \mu\text{m}\sim 20\ \mu\text{m}$)时应按食入情况处理,此时分析口腔和鼻擦拭物对确定路径也十分有用。

B.2.7 如果常规检测结果值预示是有潜在意义的摄入时,则应进行更加精确的特殊监测。

B.2.8 处理多次生物检测结果时,可以使用不加权的最小二乘法、加权的最小二乘法。当选用统计方法时,应当考虑每次测量的数据的可靠性和可变性;如果测量不可靠或怀疑不可靠应当从分析中排除。

B.2.9 不加权的最小二乘法

这时的摄入量用式(B.1)计算:

$$A_0 = \sum_i M_i m(t_i) / \sum_i [m(t_i)]^2 \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

M_i —— t_i 时刻的生物检测结果;

$m(t_i)$ ——与 t_i 相应的单位摄入生物检测的预定值。

B.2.10 加权的最小二乘法

当测量数据的不确定度不一致时,就应基于不确定度给出数据的权重因子(ω_i),这时上面的不加权的最小二乘法只要稍加修改就是加权的最小二乘法,见式(B.2):

$$A_0 = \sum_i M_i m(t_i) \omega_i / \sum_i [m(t_i)]^2 \omega_i \quad \dots\dots\dots (B.2)$$

附录 C
(资料性附录)
主要核素的剂量系数

C.1 主要核素的剂量系数见表 C.1。

表 C.1 有吸入和食入直接进入血液的不同核素的每单位摄入的待积有效剂量(剂量系数)

种类	形式 ^c	吸入		食入 ^a		注入 ^b	
		$e(g)_{inh}$ Sv/Bq		f_1	$e(g)_{ing}$ Sv/Bq	f_1	$e(g)_{inj}$ Sv/Bq
		AMAD=1 μm	AMAD=5 μm				
³ H	HTO ^{de}	1.8×10^{-11}		1	1.8×10^{-11}		1.8×10^{-11}
	OBT ^{de}	4.1×10^{-11}		1	4.2×10^{-11}		
	Gas ^d	1.8×10^{-15}					
³² P	F	8×10^{-10}	1.1×10^{-9}	0.8	2.3×10^{-10}		2.2×10^{-9}
	M	3.2×10^{-9}	2.9×10^{-9}				
⁵⁵ Fe	F	7.7×10^{-10}	9.2×10^{-10}	0.1	3.3×10^{-10}	0.1	3.0×10^{-9}
	M	3.7×10^{-10}	3.3×10^{-10}				
⁵⁹ Fe	F	2.2×10^{-9}	3.0×10^{-9}	0.1	1.8×10^{-9}	0.1	8.4×10^{-9}
	M	3.5×10^{-9}	3.2×10^{-9}				
⁶⁰ Co	M	9.6×10^{-9}	7.1×10^{-9}	0.1	3.4×10^{-9}		1.9×10^{-8}
	S	2.9×10^{-8}	1.7×10^{-8}	0.05	2.5×10^{-9}		
⁶⁷ Ga	F	6.8×10^{-11}	1.1×10^{-10}	0.001	1.9×10^{-10}		1.2×10^{-10}
	M	2.3×10^{-10}	2.8×10^{-10}				
⁸⁵ Sr	F	3.9×10^{-10}	5.6×10^{-10}	0.3	5.6×10^{-10}		1.1×10^{-9}
	S	7.7×10^{-10}	6.4×10^{-10}	0.01	3.3×10^{-10}		
⁸⁹ Sr	F	1.0×10^{-9}	1.4×10^{-9}	0.3	2.6×10^{-9}		3.1×10^{-9}
	S	7.5×10^{-9}	5.6×10^{-9}	0.01	2.3×10^{-9}		
⁹⁰ Sr	F	2.4×10^{-8}	3.0×10^{-8}	0.3	2.8×10^{-8}		8.8×10^{-8}
	S	1.5×10^{-7}	7.7×10^{-8}	0.01	2.7×10^{-9}		
⁹⁵ Zr	F	2.5×10^{-9}	3.0×10^{-9}	0.002	8.8×10^{-10}		1.0×10^{-8}
	M	4.5×10^{-9}	3.6×10^{-9}				
	S	5.5×10^{-9}	4.2×10^{-9}				
⁹⁵ Nb	M	1.4×10^{-9}	1.3×10^{-9}	0.01	5.8×10^{-10}		2.1×10^{-9}
	S	1.6×10^{-9}	1.3×10^{-9}				
⁹⁹ Tc	F	2.9×10^{-10}	4.0×10^{-10}	0.8	7.8×10^{-10}		8.7×10^{-10}
	M	3.9×10^{-9}	3.2×10^{-9}				
^{99m} Tc	F	1.2×10^{-11}	2.0×10^{-11}	0.8	2.2×10^{-11}		1.9×10^{-11}
	M	1.9×10^{-11}	2.9×10^{-11}				
¹⁰⁶ Ru	F	8.0×10^{-9}	9.8×10^{-9}	0.05	7.0×10^{-9}		3.0×10^{-8}
	M	2.6×10^{-8}	1.7×10^{-8}				
¹²⁵ Sb	F	1.4×10^{-9}	1.7×10^{-9}	0.1	1.1×10^{-9}		5.4×10^{-9}
	M	4.5×10^{-9}	3.3×10^{-9}				
¹²³ I	F	7.6×10^{-11}	1.1×10^{-10}	1	2.1×10^{-10}		2.2×10^{-10}
	V ^c	2.1×10^{-10}					
¹²⁴ I	F	4.5×10^{-9}	6.3×10^{-9}	1	1.3×10^{-8}		1.3×10^{-8}
	V ^c	1.2×10^{-8}					

表 C.1 (续)

种类	形式 ^c	吸入		食入 ^a		注入 ^b		
		$e(g)_{inh}$ Sv/Bq		f_1	$e(g)_{ing}$ Sv/Bq	f_1	$e(g)_{inj}$ Sv/Bq	
		AMAD=1 μm	AMAD=5 μm					
¹²⁵ I	F	5.3×10^{-9}	7.3×10^{-9}	1	1.5×10^{-8}		1.5×10^{-8}	
	V ^c	1.4×10^{-8}						
¹³¹ I	F	7.6×10^{-9}	1.1×10^{-8}	1	2.2×10^{-8}		2.2×10^{-8}	
	V ^c	2.0×10^{-8}						
¹³⁴ Cs	F	6.8×10^{-9}	9.6×10^{-9}	1	1.9×10^{-8}		1.9×10^{-8}	
¹³⁷ Cs	F	4.8×10^{-9}	6.7×10^{-9}	1	1.3×10^{-8}		1.4×10^{-8}	
¹⁴⁴ Co	M	3.4×10^{-8}	2.3×10^{-8}	5×10^{-4}	5.2×10^{-9}		1.7×10^{-8}	
	S	4.9×10^{-8}	2.9×10^{-8}					
¹⁵³ Gd	F	2.1×10^{-9}	2.5×10^{-9}	5×10^{-4}	2.7×10^{-10}		8.6×10^{-9}	
	M	1.9×10^{-9}	1.4×10^{-9}					
²⁰¹ Tl	F	4.7×10^{-11}	7.6×10^{-11}	1	9.5×10^{-11}		8.7×10^{-11}	
²¹⁰ Pb	F	8.9×10^{-7}	1.1×10^{-6}	0.2	6.8×10^{-7}	0.2	3.5×10^{-6}	
²¹⁰ Po	F	6.0×10^{-7}	7.1×10^{-7}	0.1	2.4×10^{-7}		2.4×10^{-6}	
	M	3.0×10^{-6}	2.2×10^{-6}					
²²⁶ Ra	M	3.2×10^{-6}	2.2×10^{-6}	0.2	2.8×10^{-7}		1.4×10^{-6}	
²²⁸ Ra	M	2.6×10^{-6}	1.7×10^{-6}	0.2	6.7×10^{-7}		3.4×10^{-6}	
²²⁸ Th	M	3.1×10^{-5}	2.3×10^{-5}	5×10^{-4}	7.0×10^{-8}	5×10^{-4}	1.2×10^{-4}	
	S	3.9×10^{-5}	3.2×10^{-5}					
²³² Th	M	4.2×10^{-5}	2.9×10^{-5}	5×10^{-4}	2.2×10^{-7}	5×10^{-4}	4.5×10^{-4}	
	S	2.3×10^{-5}	1.2×10^{-5}					
²³⁴ U	F	5.5×10^{-7}	6.4×10^{-7}	0.02	4.9×10^{-8}		2.3×10^{-6}	
	M	3.1×10^{-6}	2.1×10^{-6}	0.002	8.3×10^{-9}			
	S	8.5×10^{-6}	6.8×10^{-6}					
²³⁵ U	F	5.1×10^{-7}	6.0×10^{-7}	0.02	4.6×10^{-8}		2.1×10^{-6}	
	M	2.8×10^{-6}	1.8×10^{-6}	0.002	8.3×10^{-9}			
	S	7.7×10^{-6}	6.1×10^{-6}					
²³⁸ U	F	4.9×10^{-7}	5.8×10^{-7}	0.02	4.4×10^{-8}		2.1×10^{-6}	
	M	2.6×10^{-6}	1.6×10^{-6}	0.002	7.6×10^{-9}			
	S	7.3×10^{-6}	5.7×10^{-6}					
²³⁷ Np	M	2.1×10^{-5}	1.5×10^{-5}	5×10^{-4}	1.1×10^{-7}	5×10^{-4}	2.1×10^{-4}	
²³⁹ Np	M	9.0×10^{-10}	1.1×10^{-9}	5×10^{-4}	8.0×10^{-10}	5×10^{-4}	3.8×10^{-10}	
²³⁸ Pu	M	4.3×10^{-5}	3.0×10^{-5}	5×10^{-4}	2.3×10^{-7}	5×10^{-4}	4.5×10^{-4}	
	S	1.5×10^{-5}	1.1×10^{-5}		1×10^{-5}			8.8×10^{-9}
					1×10^{-4}			4.9×10^{-8}
²³⁹ Pu	M	4.7×10^{-5}	3.2×10^{-5}	5×10^{-4}	2.5×10^{-7}	5×10^{-4}	4.9×10^{-4}	
	S	1.5×10^{-5}	8.3×10^{-6}		1×10^{-5}			9.0×10^{-9}
²⁴⁰ Pu	S	1.5×10^{-5}	8.3×10^{-6}	1×10^{-4}	5.3×10^{-8}	5×10^{-4}	4.9×10^{-4}	
				1×10^{-5}	9.0×10^{-9}			
				1×10^{-4}	5.3×10^{-8}			
²⁴¹ Pu	M	8.5×10^{-7}	5.8×10^{-7}	5×10^{-4}	4.7×10^{-9}	5×10^{-4}	9.5×10^{-6}	
	S	1.6×10^{-7}	8.4×10^{-8}		1×10^{-5}			1.1×10^{-10}
S	1.6×10^{-7}	8.4×10^{-8}	1×10^{-4}	9.6×10^{-10}				
			1×10^{-4}	9.6×10^{-10}				

表 C.1 (续)

种类	形式 ^c	吸入		食入 ^a		注入 ^b	
		$e(g)_{inh}$ Sv/Bq		f_1	$e(g)_{ing}$ Sv/Bq	f_1	$e(g)_{inj}$ Sv/Bq
		AMAD=1 μm	AMAD=5 μm				
²⁴¹ Am	M	3.9×10^{-5}	2.7×10^{-5}	5×10^{-4}	2.0×10^{-7}	5×10^{-4}	4.0×10^{-4}
²⁴² Cm	M	4.8×10^{-6}	3.7×10^{-6}	5×10^{-4}	1.2×10^{-8}	5×10^{-4}	1.4×10^{-5}
²⁴⁴ Cm	M	2.5×10^{-5}	1.7×10^{-5}	5×10^{-4}	1.2×10^{-7}	5×10^{-4}	2.4×10^{-4}

^a f_1 仅用于食入。

^b 直接摄入到血液。 f_1 仅用于钚通过小肠在循环的情况,其他情况无效。

^c 对肺吸收类型。

^d 对于气体和蒸汽,AMDM不能用于这种情况。

^e HTO:氚水。OBT:有机结合氚。



附录 D

(资料性附录)

摄入量和内照射剂量估算举例

D.1 摄入量和内照射剂量估算举例

示例 1(生物样品检测的例子)

一个工作人员在日常工作中受到 UF 和 UO_2F_2 的照射,它们属 F 类吸收,在完成一项特殊任务后的 1 d,他提供了 24 h 的尿样和粪样,分别测得 ^{238}U 的值为:360 Bq/24 h 和 140 Bq/24 h。尿样和粪样的体积和质量与 24 h 的排泄量一致。在第一次采样后,第二天,第四天(在假定摄入后的第三天和第五天)也进行了尿样和粪样的采样,并进行了生物样品监测。其测量结果列在表 D.1 中。

表 D.1 尿样和粪样抽样结果

摄入后天数 d	尿样 Bq/24 h	粪样 Bq/24 h
3	12	90
5	10	12

要估算这次内污染的剂量的首要问题是确定摄入的路径。因此,这一估算问题的首要问题是进行摄入路径分析。为了能解释生物样品监测的结果和进行剂量估算,确定其射入路径是十分必要的。为此,我们对摄入后的尿样和粪样测量结果进行了分析,并将结果列在表 D.2 中。

表 D.2 摄入后的尿样和粪样测量结果分析(摄入量估算)

摄入后的天数 d	样品	活度 Bq/24 h	$m(t)$ Bq/Bq	摄入量估算结果 Bq
1	尿样	360	1.8×10^{-1}	2 000
1	粪样	140	1.1×10^{-1}	1 273
3	尿样	12	4.6×10^{-3}	2 609
3	粪样	90	8.4×10^{-2}	1 071
5	尿样	10	4.2×10^{-3}	2 381
5	粪样	12	1.4×10^{-2}	857
平均(尿)				2 330

在第一天摄入后,尿样的放射性测量结果比粪样高,这是在食入的情况中不应有的情况。在摄入后的第五天,尿样的放射性测量结果与粪样结果差别不大,这也是在食入的情况中不应有的情况。因此,可以认为,这个工作人员接受的是 ^{238}U 的 F 类吸入照射。假定 $AMAD=5 \mu m$,我们就可以查相应的 $m(t)$ 值(见 GBZ 129—2002 的附录 A)。

可按如下的方法计算 ^{238}U 引起的有效剂量,从附录 C 中可得到 ^{238}U , F 类吸入时的 $e(\tau)=5.8 \times 10^{-7} Sv/Bq$,这时应使用几次尿样测量结果的平均值(2 330 Bq)做为摄入量(A_0),则:

$$E(50) = 2\,330 \times 5.8 \times 10^{-7} \\ \approx 1.4 \text{ mSv}$$

天然铀的组成是:0.489 ^{234}U , 0.022 ^{235}U 和 0.489 ^{238}U 。

从附录 C 中可查出 ^{234}U 和 ^{235}U 类吸入时的 $e(\tau)$ 分别为 $6.4 \times 10^{-7} Sv/Bq$ 和 $6.0 \times 10^{-7} Sv/Bq$ 。

$$\begin{aligned} \text{天然铀的 } E(50) &= 2\,330/0.489 \times 0.489 \times 6.4 \times 10^{-7} + 2\,330/0.489 \times 0.022 \times 6.0 \times 10^{-7} + 1.4 \\ &\approx 1.5 + 0.1 + 1.4 \\ &\approx 3.0 \text{ mSv} \end{aligned}$$

示例 2(体外全身测量的例子)

通过常规的全身计数器测量,发现甲、乙两名工作人员的体内存在着¹³⁷Cs 和⁶⁰Co 内污染,其活度分别为:

甲 ¹³⁷Cs 52 Bq; ⁶⁰Co 192 Bq。

乙 ¹³⁷Cs 133 Bq; ⁶⁰Co 48 Bq。

根据回忆和有关记录,推测出事故是发生在去年 10 月 15 日的一次爆炸事故中的吸入污染事故。全身计数器测量是今年 10 月 15 日进行的,因此从吸入到测量之间的时间的间隔 t 为 365 d。

从 GBZ 128—2002 的附录 A 中,我们可以查出 $t=365$ d 时全身测量情况下⁶⁰Co M 类和 S 类的 $m(t)$ 值分别取为 0.07 和 0.05,¹³⁷Cs 的 $m(t)$ 值取为 0.4,从而用式(1)可推算出甲、乙两名工作人员的摄入量 A_0 如下:

甲 ¹³⁷Cs 130 Bq; ⁶⁰Co 2 743 Bq(M 类), 3 840 Bq(S 类)。

乙 ¹³⁷Cs 333 Bq; ⁶⁰Co 686 Bq(M 类), 960 Bq(S 类)。

由附录 B 中可查出此类情况下¹³⁷Cs 和⁶⁰Co 的 $e(\tau)$ 值分别为: 6.7×10^{-9} Sv/Bq 和 7.1×10^{-9} Sv/Bq, 再利用式(4)可推算出甲、乙两名工作人员此次情况下所接受的待积有效剂量如下:

甲 ¹³⁷Cs 0.87 μ Sv; ⁶⁰Co 19.5 μ Sv(M 类), 27.3 μ Sv(S 类)。

乙 ¹³⁷Cs 2.23 μ Sv; ⁶⁰Co 4.9 μ Sv(M 类), 6.8 μ Sv(S 类)。

无论是按上面的剂量评价,或摄入量评价来看,本事故中甲、乙两名工作人员所受到的¹³⁷Cs 和⁶⁰Co 混合内照射均是比较轻微的。

D.2 摄入氚水的直接剂量估算

氚衰变仅发射一个弱 β 粒子(平均能量 5.7 keV),并且仅能用排泄物进行放射性摄入探测。因为尿中的氚浓度很快的接近身体里水里的水平,分布这些水的软组织的剂量率可从尿样来估算,如果必要每天可测量几次。用 $E=0.0057$ MeV 和 $m=68.8$ kg,每单位放射性活度的比有效剂量率可按如下方法计算:总氚每贝可引起的每天剂量是 1.15×10^{-12} Sv。

在整个监测期间(通常为 2 周),设监测期内第 t_i 天检测的尿中的浓度为 C_i (Bq/L), t_{i+1} 天检测的尿中的浓度为 C_{i+1} (Bq/L),则,95%置信水平在监测期内的有效剂量(E)可用式(D.1)计算:

$$E = \frac{(C_{i+1} - C_i)(t_{i+1} - t_i)}{2} \times 4.8 \times 10^{-11} \dots\dots\dots(D.1)$$

式中 E 的单位为 Sv。

在最后一次测量后的一段时间内由累积丰度引起的待积有效剂量 E (Sv) 可用的一个简单的估算方法估算,这个方法是用最后一次尿样参量结果 C_n ,并应用连续沉积时的半衰期的默认值推导求出的。在没有其他证据的情况下,半衰期可以用 10 d。其计算公式见式(D.2):

$$E = \frac{4.8 \times 10^{-11} C_n}{\ln 2/10} = 6.9 \times 10^{-10} C_n \dots\dots\dots(D.2)$$

式中 E 的单位为 Sv。

摄入 HTO 中大约有 1%~3% 由于代谢而会在组织中被束缚在碳上,并假定以 40 d 为半衰期翻转为 HTO。由于被束缚的氚在整个循环过程对待积有效剂量的贡献仅 10%,而且,通常也难以单独测量束缚的氚,它对剂量的作用通常使 HTO 的剂量系数增加 10%,这时每单位(Bq/L)束缚氚和总氚的剂量分别增加到每天 5.3×10^{-11} Sv 和 7.6×10^{-10} Sv。

作为一个例子,表 D.3 列出了一个工作人员六周内的尿氚浓度测量值,表中也列出了每一个抽样期接受的待积有效剂量[按式(D.1)计算,对剂量系数考虑了上述的束缚修正]。

用式(D.2)计算最后一次抽样的待积有效剂量为 0.76 mSv(剂量系数考虑了上述的束缚修正)。

监测期(T)内接受的总剂量= $0.34/2+0.45+0.35+0.56/2=1.25$ mSv。

表 D.3 工作人员尿中的氡浓度测量

日期	尿中的氡浓度 mBq/L	抽样期间的有效剂量 mSv
2001年12月28日	0.40	—
2002年1月5日	1.20	0.34
2002年1月14日	0.70	0.45
2002年1月25日	0.50	0.35
2002年2月8日	1.00	0.56