

核动力舰船救援潜水员受照剂量估算方法研究

蒋以山, 高 正, 罗江华, 陈鲁宁

中图分类号: R144.1 文献标识码: B 文章编号: 1004-714X(2008)01-0186-02

【摘要】 目的 为了科学地计算潜水员在失事核动力舰船救援过程中的受照剂量。方法 针对潜水员在核动力舰船救援过程中可能受到的辐射途径, 结合个人剂量的估算方法。结果 提出了潜水员在作业过程中吸入放射性气体内照射、气载放射性物质外照射、海面放射性物质外照射、海水中放射性物质外照射、皮肤表面污染照射剂量的估算方法。结论 为及时准确地掌握潜水员在救援行动中所受的辐射剂量, 判断辐射可能对潜水员产生的健康影响, 科学合理地实施救援行动提供了技术依据。

【关键词】 核动力舰船; 潜水员; 剂量估算

当失事的核动力舰船发生核泄漏时, 从事救援工作的潜水员需要在有核辐射的环境下对核动力舰船进行各种救援工作。笔者对潜水员在救援过程中可能受到辐射途径进行分析, 并提出了可用于潜水员受到辐射剂量的估算方法。

1 潜水员受照途径

潜水员所接受的照射分为内照射和外照射。

内照射主要来自以下几方面: 由于作业水域大气中放射性污染导致潜水员在水下前和出水后因吸入放射性气体而产生的内照射; 潜水员在作业时因受伤导致放射性物质从伤口浸入体内产生的内照射; 潜水员作业时因受污染的海水或饮用水进入体内产生的内照射; 潜水员作业时因放射性物质从裸露的皮肤表面渗入体内而产生的内照射。

外照射途径有: 下水前和出水后作业水域气载放射性核素产生的外照射; 下水前和出水后由于海面放射性物质产生的外照射; 水中作业时海水中放射性核素产生的外照射; 作业时因裸露的皮肤表面受放射性物质污染产生的外照射。

潜水员的受照剂量(H)是指潜水员在整个救援活动中所受的外照射剂量(H_e)和摄入放射性核素所产生的待积剂量(H_i)之和:

$$H=H_e+H_i$$
 (1)

2 吸入放射性气体内照射剂量

考虑到潜水员工作时的特殊性, 吸入放射性气体是产生内照射的主要因素, 其他几种情况的发生概率和产生的受照剂量相对较小。

吸入放射性核素所产生的器官剂量可由下式给出:

$$D_b=\Psi\cdot B\cdot DCF_b$$
 (2)

式中: D_b—吸入内照射剂量, Sv; Ψ—核素的时间积分浓度, Bq·s·m⁻³; B—人的呼吸速率, m³·s⁻¹;

DCF_b—吸入待积剂量转换因子, Sv·Bq⁻¹。

表 1 成人的待积剂量转换因子(Sv·Bq⁻¹)

核素	骨髓	甲状腺	有效剂量
⁹⁰ Sr	3.1E-07	2.3E-09	4.6E-08
¹⁰³ Ru	3.4E-10	2.8E-10	1.9E-09
¹⁰⁶ Ru	4.0E-09	4.0E-09	3.3E-08
¹³² Te	4.1E-10	5.3E-08	3.0E-09
¹³¹ I	5.7E-11	2.7E-07	1.3E-08
¹³⁵ I	2.2E-11	7.6E-09	4.6E-10
¹³⁴ Cs	1.2E-08	1.1E-08	1.2E-08
¹³⁷ Cs	8.2E-09	8.0E-09	8.5E-09

待积剂量转换因子和呼吸速率与年龄有很大关系, 后者

作者单位: 潜艇学院环境室, 山东 青岛 266071
作者简介: 蒋以山(1976~), 男, 讲师, 研究方向: 辐射防护。

kBq标准条件下被校准仪器测量值; 注: R为非法定计量单位, 1R=2.58×10⁻⁴C/kg

3 检测结果

对通过 50台放疗剂量仪的充电前后漏电、测量重复性、长期稳定性的三项检测, 其中有 40台完全符合校准检测的要求, 合格率为 80%。检测标准要求仪器的漏电为 ±1.0%; 测量重复性为 ±0.5%; 长期稳定性为 ±1.0%/a。根据校准检测结果, 80%以上的放疗剂量仪性能符合要求, 但也有部分单位的放疗剂量仪存在着问题, 成因是: ①仪器设备有故障, 不及时的进行维修; ②仪器缺乏定期校准, 直至仪器不能工作或出现了严重故障了才进行校准; ③仪器出现故障后私自处理, 但处理方法不当; ④仪器设备严重老化, 确仍在在使用; ⑤该仪器属精密设备, 但由于保管不当致使其损坏等。严重影响了放射治疗监测工作。目前, 根据国家的有关规定, 对放疗剂量仪的检测结果符合国家标准要求的仪器核发校准证书后才能进行放射治疗设备的监测工作。

4 讨论

为了保证放疗剂量仪的性能稳定, 加强放射治疗质量控制, 减少与避免放射事故的发生应: (1)加强放疗剂量仪的管理, 严格按照国家标准规定的检定和校准周期, 定期送到有关的检测机构进行检测校准。(2)要严格按照仪器的使用说明书进行正确的操作。(3)仪器出现故障时要及时送修, 并要重新进行校准, 才能使用。(4)要由专人进行仪器的维护和使用。(5)要保留好仪器的检定或校准证书, 仪器送检时必须附上。

因此, 加强有关内容的培训, 提高管理水平, 调整人员, 配备一定的维护、维修人员^[3], 严格按照国家规定进行检定或校准工作, 是一个值得重视的问题。

参考文献:

[1] 赵士庵, 欧向明. 我国辐射防护仪器的应用现状和校准[J]. 中国辐射卫生, 2006 15(4): 409-411.
[2] JJG912-96 治疗水平电离室剂量计[S].
[3] 岑明阳, 赵士庵. 广西 X γ 辐射防护仪表刻度及结果分析[J]. 广西预防医学, 1996 2(1): 25-26.

(收稿日期: 2008-01-03)

还与人的活动剧烈程度有关。表 1列出了根据 ICRP第 30号出版物^[3]中的代谢模式确定的几种典型核素对成人的待积剂量转换因子。

3 气载放射性核素外照射剂量

当救援水域空气受到放射性物质污染时,所有在该水域的人员由气载放射性核素产生的外照射剂量可由下式^[1]求出:

$$D_{EC} = X_{空气} \cdot g_{EC} \cdot k \tag{3}$$

式中: D_{EC} —气载放射性核素产生的外照射剂量, Sv
 $X_{空气}$ —海面(地面)空气中的时间积分放射性浓度, $Bq \cdot s \cdot m^{-3}$; g_{EC} —气载放射性核素的剂量转换因子, $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$; k —大气弥散修正因子,考虑了气载放射性核素的最终扩展和非均匀性。

表 2列出了几种典型核素对成人的(烟云)气载放射性核素照射剂量转换因子。

表 2 成人的烟云照射剂量转换因子 ($Sv / (Bq \cdot s \cdot m^{-3})$)

核素	骨髓	甲状腺	有效剂量
⁹⁰ Kr	9 510E-14	1. 141E-13	1 008E-13
¹⁰³ Ru	2 060E-14	2 504E-14	2 184E-14
¹⁰⁶ Ru	9 193E-15	1. 109E-14	9 689E-15
¹³² Te	8 876E-15	1. 141E-14	9 764E-15
¹³¹ I	1 680E-14	2 060E-14	1 800E-14
¹³⁵ I	7 608E-14	9 193E-14	7 908E-14
¹³³ Xe	9 872E-16	1. 585E-15	1 368E-15
¹³⁵ Xe	1 046E-14	1. 300E-14	1 132E-14
¹³⁴ Cs	7 291E-14	8 876E-14	7 570E-14
¹³⁷ Cs	2 519E-14	1. 999E-14	2 687E-14

4 海面放射性物质外照射剂量

参考地面照射剂量的计算方法,假设作业点周围污染的放射性浓度是水平均匀分布,来自海面的放射性物质产生的 γ 外照射器官剂量按照下式^[1]计算:

$$D_{EG}(T) = X_{GR} \cdot g_{EG}^T \tag{4}$$

式中: $D_{EG}(T)$ —海面核素的 γ 照射积分到时间 T 的积分剂量 (Sv); X_{GR} —海面的初始放射性浓度 $Bq \cdot m^{-2}$; g_{EG}^T —海面照射的剂量转换因子,在时段 T 进行积分,考虑每种核素的放射性衰变和在海水中的扩散迁移, $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1}$ 。

在表 3中列出一些核素的地面照射剂量转换因子(积分时间为 1d积分时间为 7d时数值增大大约一个量级),可作为海面照射的剂量转换因子的参考。

表 3 地面(海面)照射的剂量转换因子 ($Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1}$)

核素	骨髓	甲状腺	有效剂量
¹⁰³ Ru	2 693E-11	3 171E-11	2 762E-11
¹⁰⁶ Ru	1 152E-11	1. 357E-11	1 182E-11
¹³² Te	1 107E-10	1. 303E-10	1 135E-10
¹³¹ I	2 217E-11	2 611E-11	2 274E-11
¹³⁵ I	3 447E-11	4 058E-11	3 535E-11
¹³⁴ Cs	8 580E-11	1. 010E-10	8 800E-11
¹³⁷ Cs	3 115E-11	3 668E-11	3 195E-11

5 海水中放射性核素外照射剂量

潜水员所受辐射剂量有其在水中的时间和水内的放射性核素的浓度有关。美国原子能委员会推荐一个计算公式可以用来计算潜水员潜水时皮肤和全身的外照射剂量,该公式如

下^[2]:

$$R_{pr} = 1.46 \times 10^{10} \times \frac{U_p M_p}{F} \sum_{i=1}^{16} Q_i D_{ipr} \exp(-\lambda_i t_p) \tag{5}$$

式中, R_{pr} —途径 P 中全部核素对器官的总剂量率, Sv/h ; Q_i —核素的释放率, Bq/s ; F —流速,即潜水员与水的相对速度, m^3/s ; t_p —核素到达照射点所需的传送时间, s ; U_p —利用率,与途径 P 有关的照射率, h ; M_p —照射点的混合比(稀释因数的倒数); λ_i —核素的放射性半衰期, h^{-1} ; D_{ipr} —剂量因数。

可以看出这个公式比较复杂,计算对皮肤的剂量率,可以用一个比较简单的计算公式^[2],

$$R_i = CC_{wi} E_{\gamma i} (Sv/h) \tag{6}$$

式中, $C=0.512 (g \cdot Gy/MeV)$ (衰变数/ $Bq \cdot d$); C_{wi} —水中第 i 种放射性核素的浓度, Bq/g ; $E_{\gamma i}$ —第 i 种核素每次衰变所释放的平均有效能量, $MeV \cdot Gy$ 衰变数 $\cdot Gy$ 。

6 皮肤表面污染照射剂量

皮肤表面受放射性物质污染产生的外照射剂量与污染核素种类及受照时间等因素有关,受污染后积累到某个时段 T 秒内的皮肤剂量可以按下式^[1]计算:

$$D_{SK}(T) = X_{SK} \int_0^T g_{SK} e^{-\lambda t} dt \tag{7}$$

式中, D_{SK} 到时间 T 时的皮肤剂量, Sv ; X_{SK} —皮肤表面的初始放射性污染浓度, $Bq \cdot m^{-2}$; g_{SK} —皮肤污染的剂量率转换因子, $Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$; λ —有效衰变常数, s^{-1} ; λ 可用下式由物理衰变常数 (λ_p)和皮肤污染的生物衰变常数 (λ_b)求出:

$$\lambda = \lambda_p + (\lambda_r + \lambda_b) \tag{8}$$

放射性核素在皮肤上的生物半衰期主要由皮肤表面的消除过程决定,典型值约为 30d清洗会显著地缩短生物半衰期。

表 4列出一些典型核素的皮肤污染照射剂量率转换因子。

表 4 皮肤污染的剂量率转换因子 [$Sv \cdot m^2 \cdot Bq^{-1} \cdot s^{-1}$]

核素	转换因子	
	γ	β
⁸⁸ Rb	2E-10	1E-11
⁹⁰ Sr	5E-10	—
¹⁰³ Ru	2E-10	9E-12
¹⁰⁶ Ru	4E-10	4E-12
¹³² Te	2E-10	5E-12
¹³¹ I	4E-10	7E-12
¹³⁵ I	4E-10	3E-12
¹³⁴ Cs	3E-10	3E-11
¹³⁷ Cs	4E-10	—

笔者对潜水员可能受到的辐射剂量估算进行了初步分析研究,提出了潜水员受到的辐射剂量估算方法,为及时准确地掌握潜水员在救援行动中所受的辐射剂量,判断辐射可能对潜水员产生的健康影响,科学合理地实施救援行动提供了技术依据。

参考文献:

[1] IAEA JR A 核事故场外应急响应[M]. 北京: 原子能出版社, 1999
[2] 杰弗里 G·艾科尔兹. 核动力的环境问题[M]. 北京: 原子能出版社, 1985
[3] STENHAURE C COSMAJ Ingestion pathways and food bans [R] Repot KK- 4334 1992