

# 世界核燃料循环职业照射基本情况分析

乔亚华,付陟玮,陈海英,张春明

环境保护部核与辐射安全中心安全研究所,北京 100082

**摘要** 准确把握职业照射的水平及其变化趋势,是评价辐射防护管理水平和开展辐射防护最优化的重要参考。本文总结了世界核燃料循环体系工作人员职业照射(数据截至到 2004 年)的基本情况,所涉及的活动主要包括铀矿开采和冶炼、铀转化和浓缩、核燃料元件生产、核电运行、核燃料后处理及放射性废物管理等方面,数据每 5 年为一个时间段,主要来源于(OECD/NEA)数据库和 IAEA 的 ISOE 消息系统及 UNSCEAR。文中在介绍受照剂量的数据评估方法基础上,对核燃料循环各项活动中工作人员受到的职业照射剂量情况进行了分析比较。结果表明,在核燃料循环的各个环节,铀矿开采受到的职业照射剂量最大,其次是铀浓缩与转化和燃料制造;在 1975—2004 年间;核燃料循环体系职业照射的整体水平呈下降趋势,尤其是 20 世纪 90 年代后,有效剂量明显降低,从事相关职业的工作人员的健康和得到了有效保障。

**关键词** 核燃料循环;职业照射;有效剂量

中图分类号 TL71

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.19.012

## Worldwide Basic Situation Analysis on Occupational Radiation Exposures of Nuclear Fuel Cycle

QIAO Yahua, FU Zhiwei, CHEN Haiying, ZHANG Chunming

Nuclear and Radiation Safety Center, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100082, China

**Abstract** The International Labour Organization and the International Basic Safety Standards define occupational exposure as "all exposure of workers incurred in the course of their work, with the exception of exposure excluded from the standards and exposures from practices or sources exempted by the standards". Various national authorities or institutions have used different methods to measure, record, and report the occupational data. The occupational radiation exposures in nuclear fuel cycle at the worldwide levels, which involve the uranium mining and milling, uranium conversion and enrichment, fuel component fabrication, operation of nuclear reactors, fuel reprocessing, and radiative waste management, are provided (data end up at 2004). The five-year average exposures beginning with 1975 has been evaluated. These data originate from the (OECD/NEA) database, the UNSCEAR, and ISOE of IAEA. The data assessment methodology of dose is described, and the occupational radiation exposures in nuclear fuel cycle are analyzed. The results show that in the each link of nuclear fuel cycle, the occupational radiation exposures of uranium mining is maximum, following by the uranium enrichment and conversion as well as nuclear fuel fabrication. In the period of 1975—2004, the trends of total level occupational exposures has decreased, especially after the 1990s, the average effective doses have been decreased significantly, the safety and health of workers has been effectively assured.

**Keywords** nuclear fuel cycle; occupational radiation exposure; effective dose

### 0 引言

核燃料循环过程会导致放射性物质向环境释放并使人们受到辐射照射,尤其是从事相关职业的工作人员受到照射的几率更高。中国核工业 30 年辐射环境质量评价对中国核燃料循环系统 1960—1985 年的职业照射情况进行了全面的

评估<sup>[1]</sup>,马吉增等<sup>[2]</sup>对中国 1986—2000 年的职业照射进行了系统的分析。本文旨在通过对世界从事核燃料循环工作人员的照射水平进行全面的分析与评价,准确把握世界职业照射的总体情况,进而正确认识中国核燃料循环的职业照射水平,有的放矢地制定发展规划,开展管理技术和政策研究,加

收稿日期:2013-02-20;修回日期:2013-04-19

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX06002-010)

作者简介:乔亚华,高级工程师,研究方向为核燃料循环与材料,电子信箱:yahuaq0471@sina.com

强技术培训和监管力度,提高中国职业照射监测能力,降低受照剂量,确保工作人员的安全和健康。

本文总结了 1975—2004 年世界核燃料循环工作人员职业照射的基本情况,所涉及的活动主要包括铀矿开采和冶炼、铀转化和浓缩、核燃料元件生产、核电运行、核燃料后处理及放射性废物管理等。数据每 5 年为一个时间段,主要来源于 (OECD/NEA) 数据库和 IAEA 的 ISOE 消息系统及 UNSCEAR。

### 1 数据评估方法

核燃料循环领域的吸收剂量数据比其他辐射设施应用的吸收剂量数据更全面,世界在核燃料循环能力和活动方面的统计是非常完善的,这些统计数据为推导全球的职业照射剂量水平提供了一个方便、可靠的基础。

设年集体有效剂量为  $S_w$ , 根据核燃料循环的不同活动 (例如铀矿开采、燃料制造、反应堆运行), 由不同国家提供的总的年集体有效剂量乘以系数  $f$  的倒数,  $S_w$  定义为

$$S_w = \frac{1}{f} \sum_{c=1}^n S_c$$

式中,  $S_c$  为  $c$  国家的年集体剂量,  $n$  为年集体有效剂量有记录的国家。  $f$  表示为

$$f = \sum_{c=1}^n P_c / P_w$$

式中,  $P_c$  和  $P_w$  分别为年集体有效剂量有记录的国家的核活动 and 世界所有的核活动<sup>[9]</sup>。

受监测的工作人员数为  $N_w$ , 采用类似的外推法获得。由于数据有限, 世界职业受照人员分布比  $NR_{E(W)}$  [剂量超过  $E$  (mSv) 的人员数与总职业人员数的比值] 和职业受照集体剂量分布比  $SR_{E(W)}$  由各国报告的数据简单加权平均获得。每一年的数据都经过外推法获得, 每个时间段的数据再经过简单平均。

### 2 铀矿开采与冶炼

全世界在 1990—1997 年期间共有 34 个国家进行铀矿开采, 在 1998—2003 年间减少为 24 个。加拿大的产量最大, 占世界总产量的 30%; 其次是澳大利亚占 14%; 尼日尔占 10%。世界铀矿产量的 93% 来源于加拿大、澳大利亚、哈萨克斯坦、纳米比亚、尼日尔、俄罗斯、南非、乌克兰、美国、乌兹别克斯坦等国家<sup>[9]</sup>。

铀矿开采冶炼过程中工作人员的职业照射主要来源于氦及其衰变产物的内照射和  $\gamma$  射线的外照射, 其受到的剂量与铀矿的类型有很大关系。表 1 列出了 1995—2001 年间地上和地下铀矿工作人员接受的有效剂量值, 可以看出地下铀矿工作人员接受的剂量明显高于地上铀矿, 而且地下铀矿矿工所接受的剂量要明显高于维修人员。表 2 和表 3 为 1975—2004 年世界铀矿开采和冶炼职业照射情况, 随着开采总量的减少, 铀矿开采的受监测人数、年均累积有效剂量、单位质量的平均累积剂量和年均有效剂量均大幅下降, 但在 1990—1994 年间年均有效剂量却有所增加, 随后继续下降, 在 2000—2004 年间其值为 1.9mSv<sup>[4,5]</sup>。铀矿冶炼和铀矿开采的情况类似, 在 1995 年后工作人员的受照剂量明显下降。

表 1 世界地上和地下铀矿工作人员所接受的有效剂量

Table 1 Effective doses accepted by the workers in above-ground and under-ground uranium mines

年份	全体人员			维修人员			矿工		
	人数	年人均有效剂量/mSv	氦子体含量/%	人数	年人均有效剂量/mSv	氦子体含量/%	人数	年人均有效剂量/mSv	氦子体含量/%
地上铀矿									
1995	50	0.59	80	211	1.31	77	154	1.24	59
1996	61	0.75	71	247	1.33	73	214	1.30	51
1997	102	0.32	62	202	0.55	66	244	0.94	23
1998	126	0.37	79	176	0.36	93	96	0.80	50
1999	177	0.35	62	219	0.40	73	74	0.83	11
2000	186	0.64	74	194	0.64	45	89	1.35	52
2001	208	0.58	68	189	0.57	51	47	2.15	55
地下铀矿									
1995	368	0.98	64	109	5.37	66	386	10.90	63
1996	387	0.82	60	101	3.85	62	469	9.62	58
1997	476	0.69	39	103	1.48	64	354	5.53	39
1998	346	0.55	75	139	0.93	87	362	1.97	78
1999	155	1.01	71	204	0.90	79	341	2.60	63
2000	111	0.88	53	194	0.71	70	284	2.57	40
2001	73	0.48	54	115	0.46	64	161	2.29	32

表 2 世界铀矿开采的平均照射水平

Table 2 Annual exposure levels of uranium mining in the world

时期	年开采量/kt	单位质量累积剂量 / (man Sv · kt <sup>-1</sup> )	监测人数 / 10 <sup>3</sup>	年累积剂量 / (man · Sv)	年平均有效剂量 / mSv
1975—1979	52	26	240	1300	5.5
1980—1984	64	23	310	1300	5.1
1985—1989	59	20	260	1100	4.4
1990—1994	39	8	69	310	4.5
1995—1999	34	2	22	85	3.9
2000—2004	34	1	12	22	1.9

表 3 世界铀冶炼的职业照射水平

Table 3 Occupational radiation exposure levels due to uranium milling in the world

时期	年开采量/kt	能量当量/GW	监测人数 / 10 <sup>3</sup>	累积有效剂量 / (man · Sv)	年平均有效剂量 / mSv
1975—1979	53	240	12	124	10.1
1980—1984	64	290	23	117	5.1
1985—1989	58	260	18	116	6.3
1990—1994	39	180	6	20	3.3
1995—1999	34	155	3	4	1.6
2000—2004	34	155	3	3	1.1

### 3 铀浓缩与转化

截至到 2003 年世界正在运营的铀转化厂 29 个, 铀浓缩厂 21 个<sup>[3]</sup>。在核燃料循环的铀浓缩和转化过程中, 一般外照射比内照射更值得关注, 研究表明<sup>[8]</sup>在有效剂量高于 1mSv(1~5mSv)时, 内外照射的比例分别为 17% 和 83%, 在有效剂量低于 1mSv 时, 内外照射的贡献是相同的。但在维修和泄漏的情况下, 工作人员会暴露在 UF<sub>6</sub> 的环境中, 此时, 应该主要考虑

的是 F 的化学毒性而不是放射性剂量。

图 1 为世界铀浓缩和转化的职业照射随时间变化趋势, 该数据缺少俄罗斯的数据, 因此是偏低的, 但即使考虑到这一点, 铀浓缩和转化产生的职业照射剂量也是较低的, 在 1990—2004 年间, 累积有效剂量由 1.28man · Sv 增长到 1.70man · Sv, 年均有效剂量 1985 年以后几乎没有变化, 仅为 0.1mSv<sup>[3,6,7]</sup>。

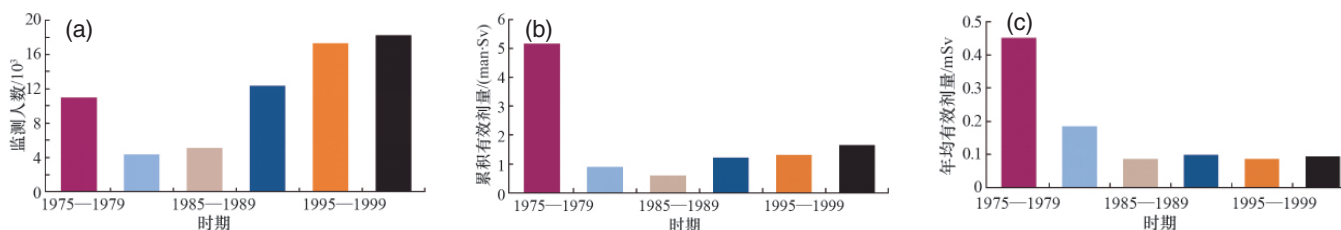


图 1 世界铀浓缩和转化的监测人员数(a)累积有效剂量(b)和平均有效剂量(c)变化趋势

Fig. 1 Changing trend of the numbers of monitored workers (a), accumulative effective doses (b) and effective doses (c) accepted by the monitored workers of uranium enrichment and conversion in the world

### 4 核燃料元件制造

核燃料元件制造职业照射主要来源于铀 (经过冶炼、浓缩和转化, 大部分衰变产物已经被除掉), 表 4 是 1975—2004 年世界核燃料元件制造职业照射的基本情况。由表 4 可知, 受监测工作人员人数在此期间是相对稳定的, 基本维持在 20000 人左右, 只有在 1985—1989 年有一个小峰值, 为 28000 人; 年累积有效剂量在 36~21man · Sv, 在 1980—1994 年变化较小, 在 21~22man · Sv, 随后增加到 31man · Sv; 年均有效剂量开始由 1.8 降低到 1.0mSv, 随后在 1995—1999 年又增加到 1.4mSv, 2000—2004 年增加到 1.6mSv<sup>[9,10]</sup>。年均有效剂量的增长有两种可能性: 其一是近些年具有较高剂量水平的新国家的数据被包括在其中, 其二是一些国家在数据中包括了内照射。研究表明, 剂量低于 1mSv 时完全是由外照射引起的, 剂量高于 1mSv 时, 内照射贡献占 30%~80%<sup>[3]</sup>。然而, 内照射的

剂量依赖于核燃料的类型, 天然铀元件制造的职业照射要远低于含有富集铀和钚的元件制造。总之, 各个国家根据自己的燃料元件类型和监测水平所提供的数据有的包括内照射, 有的不包括内照射。

表 4 世界核燃料元件制造职业照射水平

Table 4 Occupational radiation exposure levels due to nuclear fuel component fabrication in the world

时期	监测人数 / 10 <sup>3</sup>	年累积有效剂量 / (man · Sv)	年平均有效剂量 / mSv
1975—1979	20	36	1.8
1980—1984	21	21	1.0
1985—1989	28	22	0.8
1990—1994	21	22	1.0
1995—1999	22	30	1.4
2000—2004	20	31	1.6

## 5 核电运行

核电运行的职业照射水平在堆与堆之间差别很大,主要受堆的大小、类型及运行时间影响。每一类反应堆由于其设计和换料周期的不同也会影响职业照射的水平。另外,同一反应堆由于运行环境的改变其每年的职业照射水平也有差别<sup>[9]</sup>。表5是世界反应堆运行职业照射情况总结,由于各个国家情况不同,该表中数据并不是很完整,包括96%的压水堆(PWRs),99%的沸水堆(BWRs),63%的重水堆(HWRs),100%

表5 世界反应堆运行职业照射情况总结

Table 5 Summary of occupational radiation exposures due to nuclear reactor operations in the world

时期	压水堆	沸水堆	高温气冷堆	气冷堆	临界水冷石墨堆	全部
平均监测人数/ $10^3$						
1975—1979	63	59	7	13	5	147
1980—1984	140	102	14	25	10	291
1985—1989	230	139	18	31	13	431
1990—1994	310	160	20	30		530
1995—1999	265	144	18	21		448
2000—2004	283	113	23	18		437
年平均有效剂量/mSv						
1975—1979	3.5	4.7	4.8	2.8	6.6	4.1
1980—1984	3.1	4.5	3.2	1.4	6.4	3.6
1985—1989	2.2	2.4	3.4	0.8	13.2	2.5
1990—1994	1.3	1.6	1.7	0.5		1.4
1995—1999	1.9	1.7	1.6	0.3		1.5
2000—2004	1.7	1.4	1.6	0.2		1.0
年均累积有效剂量/(man·Sv)						
1975—1979	220	279	32	36	36	603
1980—1984	450	454	46	34	62	1046
1985—1989	500	331	60	24	173	1088
1990—1994	415	240	35	16	190	896
1995—1999	506	237	29	7		779
2000—2004	415	160	38	4		617
单位发电量的归一化累积有效剂量/(man·Sv·GW <sup>-1</sup> ·a <sup>-1</sup> )						
1975—1979	8.1	18.3	11.0	6.6	8.2	10.9
1980—1984	8.0	18.0	8.0	5.8	8.3	10.4
1985—1989	4.3	7.9	6.2	3.2	16.7	5.7
1990—1994	2.8	4.8	3.0	2.0	20.3	3.9
1995—1999	3.0	3.8	2.4	0.7		2.5
2000—2004	2.2	2.4	2.9	2.6		2.5
每堆归一化累积有效剂量/(man·Sv·reactor <sup>-1</sup> )						
1975—1979	2.8	5.5	2.6	0.9	3.0	3.1
1980—1984	3.3	7.0	2.4	0.8	3.8	3.7
1985—1989	2.3	4.0	2.3	0.5	8.7	2.8
1990—1994	1.7	2.7	1.1	0.4	9.4	2.1
1995—1999	2.0	2.6	1.2	0.2		1.5
2000—2004	1.6	1.8	1.0	0.2		1.1

的气冷堆(GCRs)和13%的水冷石墨堆(LWGRs)。由表5可以看出,受监测的工作人员在1994年之前呈上升趋势,之后呈下降趋势;年均累积有效剂量在1990年前一直增加到1088man·Sv,随后逐年下降,在2000—2004年下降到617man·Sv,工作人员受到的剂量约93%来源于LWGRs;每堆的归一化集体有效剂量从前两个周期的3.1和3.7持续下降到1.1man·Sv/堆,单位能量的归一化集体有效剂量从10.9持续下降到2.5man·Sv/(GW·a)<sup>[10-13]</sup>。世界由核电运行引起的职业照射剂量呈稳步下降的趋势,尤其是1990年后,下降得更为明显。这主要由于随着核电技术发展,设计方案、水化学工艺、电站运行和培训过程等都得到了大大的改进,核安全文化得到有效贯彻,同时国际数据和经验的共享也对照射剂量的下降起到了积极作用。

## 6 核燃料后处理

核燃料后处理的主要目的是回收乏燃料中的可裂变材料(铀-235、铀-238和钚)和可转换材料再循环,同时减少放射性废物体积。截至2004年,全世界运行的约444座核电站每年卸出约10000t乏燃料,累计产生乏燃料约282000t,其中约有90000t进行了后处理,其余的安全存放在储存设施里<sup>[14]</sup>。目前全世界的商用乏燃料后处理能力为5675t/a,其中英国2400t/a,法国1700t/a,日本900t/a,俄罗斯400t/a,印度275t/a。表6为世界核燃料后处理职业照射的基本情况。可以看出,受监测的工作人员在逐年上升;集体有效剂量由53man·Sv降到36man·Sv后,20世纪90年代后快速增加到67man·Sv并基本维持在这一水平;年均有效剂量一直持下降趋势,从7.1mSv降到0.9mSv<sup>[14-16]</sup>。

表6 世界核燃料后处理职业照射水平

Table 6 Occupational radiation exposure levels due to nuclear fuel reprocessing in the world

时期	监测人数/ $10^3$	年累积有效剂量/(man·Sv)	年平均有效剂量/mSv
1975—1979	8	53	7.1
1980—1984	9	46	4.9
1985—1989	17	36	2.5
1990—1994	45	67	1.5
1995—1999	59	61	1.1
2000—2004	76	68	0.9

## 7 放射性废物管理

放射性废物包括低、中、高放废物,低放废物体积占全部放射性废物体积的90%,放射性活度仅占1%,中放废物体积占7%,放射性活度占4%,高放废物体积占3%,放射性活度占95%。放射性废物管理人员接受的剂量依赖于执行的活度,年均有效剂量在0.2~11mSv<sup>[17-20]</sup>,由于数据不全,表7仅列出了部分国家的放射性废物管理人员的职业照射情况。

表 7 放射性废物管理职业照射水平

Table 7 Occupational radiation exposure levels due to radioactive waste management

国家	时期	监测人数/ 10 <sup>3</sup>	估算的受照 人数/10 <sup>3</sup>	年累积剂量		年平均有效剂量/mSv		人员分布比			
				总量/(man·Sv)	监测人数/10 <sup>3</sup>	可测量的受照射人数/10 <sup>3</sup>	NR <sub>20</sub>	NR <sub>10</sub>	NR <sub>5</sub>	NR <sub>1</sub>	
中国	1990—1994	1.51		5.33	3.53			0.09			
	1995—2000	1.30		4.03	3.10			0.08			
英国	1990—1994	0.29		0.09	0.30						
	1995—2000	0.35		0.07	0.20						
美国	1990—1994	8.05	1.90	1.22	0.15	0.65	0	0	0	0.04	
	1995—2000	5.88	1.76	1.07	0.18	0.61	0	0	0	0.05	

### 8 结论

由于各国的监测水平和国情不同,监测统计的数据尚不全面,并不能全面反映核燃料循环体系职业照射的情况,但仍然可以对其做出评估。可以看出,核燃料循环体系职业照射的整个水平是呈下降趋势的,尤其是 20 世纪 90 年代后,有效剂量明显降低,远低于中国核燃料循环体系的职业照射水平<sup>[2]</sup>。世界核燃料循环体系职业照射剂量水平的下降与辐射防护的法规标准和管理制度健全,监测和评价能力提升,以及核安全文化的大力贯彻和实施是密不可分的,中国应该加强相关技术培训和监管力度,提高中国职业照射监测能力,降低受照剂量,确保从事相关职业人员的安全和健康。

### 参考文献 (References)

[1] 潘自强. 中国核工业三十年辐射环境质量评价[M]. 北京: 原子能出版社, 1990: 29-35.  
Pan Ziqiang. Radiation environmental impact assessment of the nuclear industry in China in the three decades[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1990:29-35.

[2] 马吉增, 张良安, 潘自强. 我国职业照射水平基本状况分析[C]//全国个人剂量监测研讨会论文集汇编. 北京: 中国核学会, 2008: 10-12.  
Ma Jizeng, Zhang Liang'an, Pan Ziqiang. Basic situation of occupation exposure level in China [C]//The National Seminar on Personal Dose Monitoring. Beijing: Chinese Nuclear Society, 2008: 10-12.

[3] UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation, UNSCEAR 2008, Report[M]. New York: United Nations Publication, 2010.

[4] Quindos P L S, Fernandez N P L, Gomez A J, et al. Population dose in the vicinity of old Spanish uranium mines [J]. Science of Total Environment, 2004, 329(1-3): 283-288.

[5] Bouville A, Simon S L, Miller C W, et al. Estimates of dose from global fallout[J]. Health Physics. 2002, 82(5): 690-705.

[6] Batandjjeva B. IAEA approach for releasing radioactive material and sites from regulatory control [R]//Proceedings of an International Conference. Vienna: IAEA, 2006: 343-355.

[7] Central Statistics Office. Population estimates, all ages (PEAA001)[R]. Cork, Ireland, 2011: 23-26.

[8] CIA World factbook [M/OL]. <http://www.cia.gov/cia/publications/factbook/index.html>, 2007-04-02.

[9] International Atomic Energy Agency. Status of decommissioning nuclear facilities around the world [R]. STI/PUB/1201, Vienna: IAEA, 2004: 203-209.

[10] United States Nuclear Regulatory Commission. Occupational radiation exposure at commercial nuclear power reactors and other facilities[R]. NUREG-0713, Washington DC: National Referral Center, 2003.

[11] Berus D, Covens P, Buls N, et al. Extremity doses of workers in nuclear medicine [C]//International Congress of the International Radiation Protection Association. Madrid: Spain, May 23-28, 2004: 23-28.

[12] United States Nuclear Regulatory Commission. United States sources and effects of ionizing radiation volume I: Sources; II: Effects. United States Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, 2000 Report to the General Assembly, with scientific annexes [R]. New York: United Nations Sales Publications, 2000.

[13] Organisation for Economic Co-operation and Development, Nuclear Energy Agency. ISOE-database occupational exposures at nuclear power plants[R]. Paris: OECD, 2005.

[14] Commonwealth of Australia. Joint convention on the safety of spent fuel management[R]. Australia, 2005.

[15] Doerfel H, Andradi A, Cruz-Suárez R, et al. IAEA/IDEAs intercomparison exercise on internal dose assessment [J]. Radiation, Protection, Dosimetry, 2007, 125(4): 56-60.

[16] Vance R. Nuclear Energy Agency/International Atomic Energy Agency. Uranium 2005: Resources, production and demand [R]. Paris: OECD-NEA, Natural Resources Canada, 2006.

[17] European Commission. Effluent and dose control from European Union NORM industries: assessment of current situation and proposal for a harmonized community approach. Radiation Protection 135 [C]. Luxembourg: European Community, 2003.

[18] Frasc G, Petrova K. Dose trends in occupational radiation exposure in Europe :results from the ESOREX project [J]. Radiation Protection Dosimetry, 2007, 125(4): 121-126.

[19] Crouch J. Reduction of occupational radiation exposure to staff—A quality management approach[J]. Nuclear Medicine, 2007, 38(2): 8-13.

[20] Republic of Bulgaria. Second national report of the republic of bulgaria on fulfillment of the joint convention on the safety of radioactive waste management [R/OL]. 2005-09-02. <http://www.bnsa.bas.bg/documents/JC-pdf/English/JC-IINR-en.Pdf>.

(责任编辑 侯澄芝)